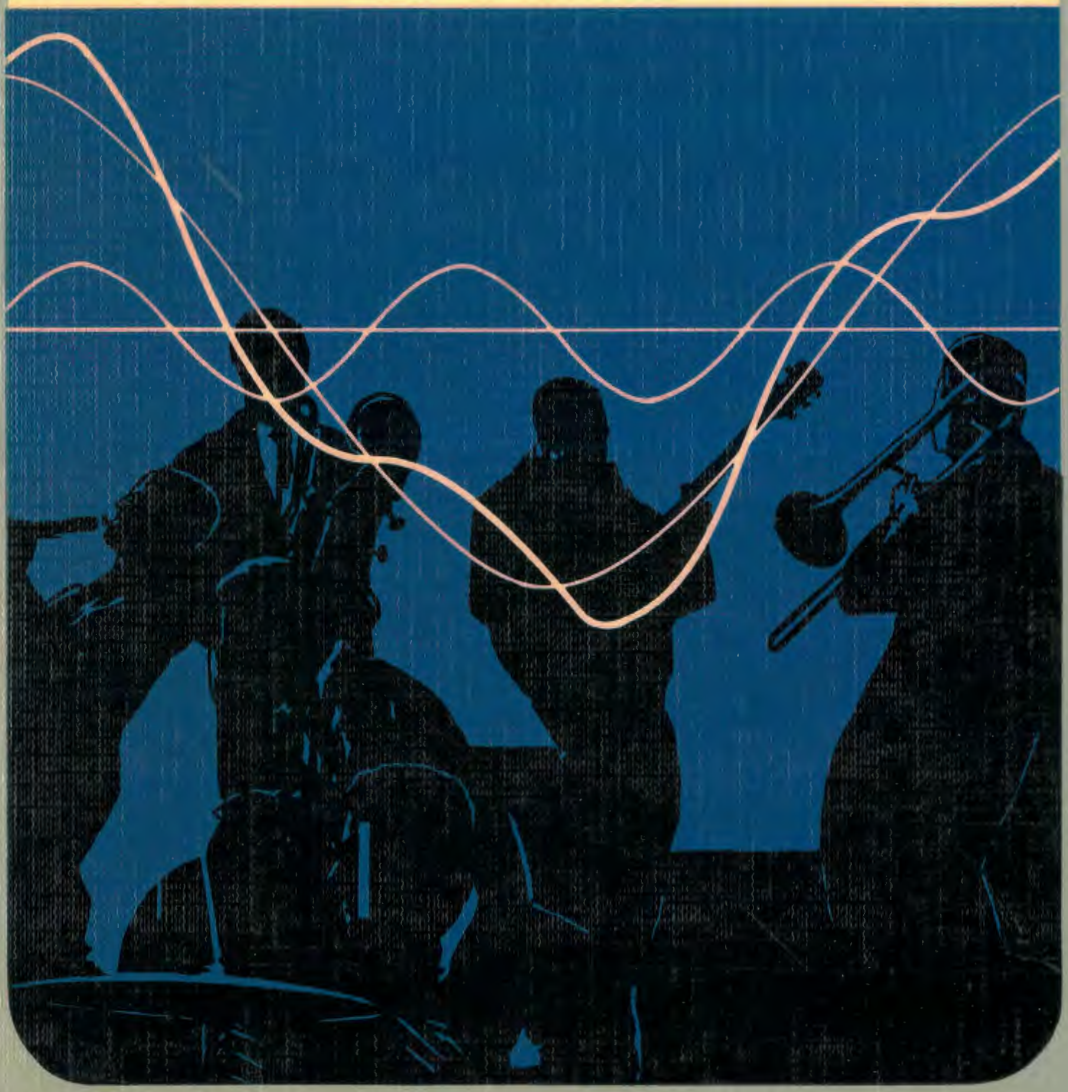
G. BIONDO E. SACCHI

RIPRODUZIONE SONORA HI-FI

con 162 figure e 7 tabelle

acustica degli ambienti - psicoacustica
stereofonia e quadrafonia
apparecchiature per la riproduzione del suono



HOEPLI

RIPRODUZIONE SONORA HI-FI

G. BIONDO - E. SACCHI

RIPRODUZIONE SONORA HI-FI

acustica degli ambienti-psicoacustica
stereofonia e quadrafonia
apparecchiature per la riproduzione del suono

con 162 figure e 7 tabelle

HOEPLI

COPYRIGHT © ULRICO HOEPLI EDITORE SPA, 1977
VIA HOEPLI 5, 20121 MILANO (ITALY)

TUTTI I DIRITTI SONO RISERVATI A NORMA DI LEGGE
E A NORMA DELLE CONVENZIONI INTERNAZIONALI

Stampa:
IGIS SpA Industrie Grafiche Italiane Stucchi
20138 Milano - Via Salomone 61 / Printed in Italy

PREMESSA

In questi ultimi anni si è notevolmente accresciuto l'interesse per la riproduzione e la registrazione fedele del suono; da un lato si è allargata la cerchia degli appassionati, con richieste di apparecchiature sempre più sofisticate, dall'altro le case costruttrici sono state in grado, grazie allo sviluppo tecnico e scientifico, di immettere sul mercato apparati di elevata qualità. Questo libro si propone di effettuare una panoramica sull'argomento dell'alta fedeltà, al fine di facilitare la comprensione dei problemi, la scelta e l'impiego corretto delle apparecchiature. In particolare è rivolto a quei lettori che desiderano:

1) analizzare come l'ascoltatore percepisce i suoni e quali sono le relazioni fra percezione e trasmissione del suono;

2) esaminare l'influenza dell'ambiente sulla qualità della riproduzione;

3) capire i principi di funzionamento dei dispositivi e delle apparecchiature in commercio;

4) essere in grado di comprendere il significato delle specifiche fornite dalle case costruttrici;

5) essere orientati sui criteri di scelta e sul corretto impiego delle apparecchiature di alta fedeltà.

Il libro non pretende certo di rispondere a tutte le domande dell'appassionato di alta fedeltà: l'ampiezza e complessità dei problemi e le continue innovazioni tecnologiche non lo consentono; il suo scopo è unicamente quello di aiutare il lettore nell'analisi dei problemi che gli vengono posti o dall'acquisto o dall'utilizzo delle apparecchiature di alta fedeltà.

GLI AUTORI

INDICE

PREMESSA VII

Capitolo Primo - LA FISICA DEL SUONO 1

I.1. Le onde sonore 1
I.2. Onde sonore e analisi armonica 3
I.3. Riflessione ed interferenza delle onde sonore; il tempo di riverberazione 8
I.4. I livelli acustici e loro unità di misura 11
I.5. Misure dei livelli acustici in un ambiente d'ascolto 13
I.6. Misura del tempo di riverberazione di un ambiente d'ascolto . . 19

Capitolo Secondo - LA CORREZIONE ACUSTICA DELL'AMBIENTE DI ASCOLTO 23

II.1. L'acustica dell'ambiente 23
II.2. I materiali fonoassorbenti 26
II.3. La correzione delle caratteristiche acustiche dell'ambiente . . . 29

Capitolo Terzo - LA RICERCA PSICOACUSTICA 31

III.1. Il livello d'intensità della sensazione auditiva 31
III.2. Valutazione della sensazione dell'altezza e il volume sonoro . . 36
III.3. Il timbro 39
III.4. Lo spazio sonoro: stereofonia e quadrafonia 42

Capitolo Quarto - LA REGISTRAZIONE E LA RIPRODUZIONE DEL SUONO. IL DISCO 45

IV.1. La registrazione e la riproduzione del suono. Generalità . . . 45
IV.2. L'incisione del solco nel disco monofonico 47
IV.3. L'incisione stereofonica 48
IV.4. Correzione dell'incisione 50
IV.5. La quadrafonia 51
IV.6. La fabbricazione dei dischi 55

Capitolo Quinto - IL PIATTO E I SISTEMI DI TRASCINAMENTO . . 59

V.1. Caratteristiche principali del sistema di trascinamento 59
V.2. Il motore 61
V.3. La trasmissione del movimento 62
V.4. Il piatto 66

Capitolo Sesto - IL BRACCIO 67

VI.1. Gli attriti 67
VI.2. L'errore di tangenza 70
VI.3. La perpendicolarità della punta lettrice alla superficie del disco . 76
VI.4. Lo skating 78
VI.5. Bilanciamento statico e peso di lettura 80
VI.6. Bilanciamento laterale 82
VI.7. Rigidità, massa, inerzia e coefficiente di elasticità 83

Capitolo Settimo - I FONORIVELATORI 85

VII.1. Considerazioni generali 85
VII.2. Fonorivelatori sensibili all'ampiezza dello spostamento della puntina 87
VII.3. Fonorivelatori sensibili alla velocità di spostamento della puntina 91
VII.4. La puntina 98
VII.5. Caratteristiche principali dei fonorivelatori 100

Capitolo Ottavo - ALTOPARLANTI, CASSE ACUSTICHE E CUFFIE . . 103

VIII.1. Altoparlanti 103
VIII.2. Casse acustiche, trombe e sistemi multipli di altoparlanti . . . 114
VIII.3. Caratteristiche degli altoparlanti e loro misura 125
VIII.4. La cuffia 137

Capitolo Nono - L'AMPLIFICATORE 141

IX.1. L'adattamento 141
IX.2. Il preamplificatore 142
IX.3. L'amplificatore di potenza 150

Capitolo Decimo - IL SINTONIZZATORE 165

X.1. La modulazione di frequenza e la modulazione d'ampiezza . . . 165
X.2. Trasmissione e ricezione per filodiffusione 168
X.3. La ricezione FM 169
X.4. Il sintonizzatore 170
X.5. La decodifica dei segnali stereofonici 172

Capitolo Undicesimo - IL MICROFONO E IL REGISTRATORE . . . 175

XI.1. Il microfono 175
XI.2. Il registratore: le caratteristiche meccaniche 192
XI.3. Processi di registrazione e di lettura 196
XI.4. La correzione della curva di risposta 202
XI.5. Schema tipo di un registratore 206
XI.6. Il rumore e la sua riduzione 208
XI.7. Registratori a cassette e a cartucce 212
XI.8. Costituzione e dimensioni del nastro 215

Capitolo Dodicesimo - SCELTA E UTILIZZAZIONE DELLE APPARECCHIATURE HI-FI 217

INDICE ALFABETICO 231

CAPITOLO PRIMO

LA FISICA DEL SUONO

L'esigenza di un ascolto musicale, in un ambiente casalingo, ad un livello qualitativamente elevato, è oggi sentita da molti.

Analizziamo quali sono i fattori fondamentali per ottenere l'ascolto ottimale. Possiamo considerare il suono come un problema di trasmissione di informazione. L'informazione è emessa da una sorgente che, nell'ambito dell'alta fedeltà, è formata dai vari componenti elettronici ed elettromeccanici; è trasportata mediante un canale di trasmissione, costituito dall'ambiente che trasporta il messaggio sonoro in codice sotto forma di vibrazioni aeree; è infine ricevuta da un ricevitore, costituito dall'uomo stesso con il suo complesso orecchio-psiche. Da questo punto di vista, per risolvere il problema di ascolto ottimale con un impianto Hi-Fi bisogna: conoscere la sorgente, comprendere gli elementi costituenti l'informazione, sapere come il contenuto dell'informazione sarà alterato dal canale di trasporto (l'ambiente), approfondire il significato di ricevitore umano e in particolar modo delle sue sensazioni psico-acustiche.

I.1. Le onde sonore

Di solito si usa l'espressione « onde sonore » per analogia e per confronto con le onde d'acqua, ricordando le onde create da un sassolino fatto cadere dolcemente su uno specchio d'acqua. Questa analogia sufficientemente corretta ci sarà utile per spiegare ed analizzare le proprietà del suono. Dall'osservazione si deduce che, dal punto in cui il sasso si è immerso, le onde scorrono via muovendosi uniformemente sullo specchio d'acqua fino a scomparire a poco a poco (se lo specchio d'acqua è abbastanza grande), oppure riflettendosi sui bordi o su altri ostacoli; questo fatto è chiamato *fenomeno ondulatorio*.

Ciò che si percepisce con l'udito non è altro che un fenomeno ondulatorio, proprio come l'increspatura che presenta l'acqua quando vi cade il sassolino. Il moto delle onde sonore, però, non avviene su una superficie bidimensionale come quella dello specchio d'acqua, ma si svolge nello spazio tridimensionale. Comunque, per compren-

dere le caratteristiche dei moti ondulatori, è sufficiente in prima approssimazione analizzare le proprietà delle onde d'acqua.

È stato detto che le onde prodotte dal sasso si allontanano con velocità costante; questa velocità si chiama *velocità di propagazione*. Le onde sono formate da creste ed avvallamenti, da punti cioè in cui il livello si innalza e da punti in cui si abbassa, rispetto alla superficie di quiete. La distanza tra due successive creste o due successivi avvallamenti si chiama *lunghezza d'onda.* Passando per un determinato punto della superficie, le onde vi creano un movimento in su e in giù dell'acqua, che si ripete periodicamente nel tempo; il numero delle ripetizioni di questo moto in un secondo è detto *frequenza* dell'onda. Nel caso del suono interessano in particolare tre aspetti fondamentali del moto ondulatorio: la *velocità* con cui l'onda si propaga (340 m/s), la *lunghezza d'onda,* la *periodicità* (o frequenza) che indica con quale velocità vibra il mezzo di trasporto dell'onda.

Analizziamo le caratteristiche di lunghezza d'onda e di frequenza. La fisiologia dell'orecchio fa sì che possiamo percepire soltanto onde la cui lunghezza è compresa fra 2 cm e 21 m circa. Dai rilievi fatti risulta tuttavia che esistono onde sonore di lunghezza molto diversa dai valori citati. Le onde sonore si classificano in tre categorie: gamma ultrasonora, con lunghezza d'onda compresa fra qualche millimetro e 2 cm; gamma sonora, con l'intervallo di lunghezza tra 2 cm e 21 m; gamma infrasonora, con lunghezze d'onda superiori a 21 m. Se dividiamo la velocità dell'onda per la lunghezza d'onda si ha la frequenza, che indica quanto frequentemente per un dato punto della superficie passano nuove creste d'onda. Esprimiamo questa grandezza in cicli fratto secondo, detti anche periodi al secondo o Hertz, rappresentati col simbolo Hz ed aventi come unità di misura 1/s o s^{-1}.

Dai dati sopra esposti risulta che la gamma sonora è formata da un intervallo chiamato *banda di frequenza udibile,* compresa fra 16 e 16.000 Hz. Si consideri la fig. I.1 che rappresenta una lunga molla tesa fra due supporti: se ne comprimiamo alcune spire ad un estremo lasciandole poi andare di colpo, la perturbazione così originata si propagherà da un estremo all'altro per poi riflettersi e tornare indietro. Se procediamo con cura, possiamo far sì che questo impulso viaggi senza che si verifichi alcun movimento verticale od orizzontale della molla; possiamo così rendere il moto della perturbazione puramente longitudinale. Poiché la perturbazione che si propaga è una compressione delle spire, queste onde longitudinali sono anche dette onde di compressione. Nella fig. I.1 abbiamo un esempio di configurazione istantanea della perturbazione e vediamo come vi siano zone in cui le spire sono più ravvicinate e altre in cui sono più distanziate.

Le onde sonore sono onde di *compressione.* Quando battiamo un colpo su un diapason, al primo istante, non facciamo altro che spingere rapidamente di lato le forcelle del diapason; il movimento è così repentino che lo strato d'aria che vi è a contatto non riesce a seguirlo; il colpo determina così un parziale vuoto d'aria vicino al diapason, proprio come nella molla in cui si era prodotto un parziale distanziamento delle spire. L'aria reagisce a questa perturbazione esattamente come la molla, e la regione di minor densità si sposta

Fig. I.1 - Onde longitudinali in una molla.

nell'aria proprio come la zona di maggior densità di spire si spostava attraverso la molla. Nell'aria si hanno variazioni di densità così come nella molla si avevano variazioni nella densità di spire. Il battere un colpo su un diapason genera, col vibrare della forcella, un gruppo di onde sonore, provocando nell'aria zone di maggiore e minore densità e, poiché le onde si propagano in tutte le direzioni, queste zone sono *sfere concentriche* che hanno come centro comune il diapason. Questa propagazione sferica è una conseguenza del fatto che le onde sonore sono *tridimensionali.* Le variazioni di densità dell'aria si possono rilevare misurando con appositi strumenti le corrispondenti *variazioni di pressione.* Quanto maggiore è la variazione di pressione tanto maggiore è l'ampiezza dell'onda.

I.2. Onde sonore e analisi armonica

Quando un'onda sonora colpisce l'orecchio, ne ricaviamo delle sensazioni, che chiamiamo *sensazioni acustiche,* che vengono così classificate: sensazione dell'*intensità,* sensazione dell'*altezza,* sensazione del *timbro.* Esse sono legate, in prima approssimazione, alle caratteristiche di ampiezza e frequenza, e precisamente la sensazione di intensità è legata all'ampiezza dell'onda, mentre le sensazioni di altezza e timbro sono legate alla frequenza.

Queste semplici relazioni fra onde sonore e sensazioni acustiche portano, come vedremo, ad una tale quantità di complessi problemi che ancora oggi non sono stati completamente risolti.

Non possiamo analizzare la sensazione prodotta da un accordo musicale suonato da tutti i componenti di una grande orchestra sinfonica utilizzando solo le caratteristiche di ampiezza e frequenza, anche se globalmente all'orecchio istante per istante l'aria si trova ad una determinata pressione e vibra con una determinata frequenza. Per poter descrivere le sensazioni uditive occorre determinare quegli elementi fondamentali, più facilmente analizzabili, che sommati fra loro ci danno un'idea più chiara di come una data onda sonora provochi una determinata sensazione acustica.

Oggi esistono complesse apparecchiature che permettono di eseguire in modo completo l'analisi delle caratteristiche fisiche del suono, mentre non si è ancora in grado di compiere *l'analisi psico-acustica,* cioè l'analisi di come opera l'insieme orecchio-cervello.

Sia l'analisi oggettiva del suono sia i fattori psico-acustici hanno un'importanza fondamentale per l'alta fedeltà, poiché la qualità o fedeltà di riproduzione è data dalla misura in cui sono conservate e raccolte le caratteristiche del suono originale.

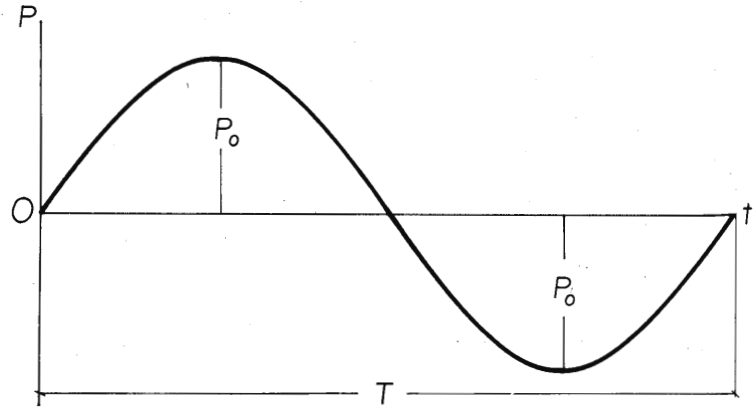


Fig. I.2 - Onda sinusoidale.

Gli elementi fondamentali per l'analisi del suono sono delle onde sonore dette *onde sinusoidali.* Un'onda sinusoidale ha determinate proprietà matematiche che si possono rappresentare con un diagramma.

Il diagramma di fig. I.2 mostra come varia la pressione dell'aria in un punto dello spazio al passare del tempo; l'*ampiezza* dell'onda

è data dal valore P_o, positivo o negativo, corrispondente alla massima compressione o alla massima depressione dell'aria in un determinato punto dello spazio.

T è detto *periodo* e rappresenta l'intervallo di tempo in cui si ripetono le stesse condizioni di pressione. Il periodo è legato alla frequenza f dalla relazione $f = 1/T$.

Durante ciascuna vibrazione vi è un momento in cui il valore della pressione dell'aria passa per la condizione di equilibrio muovendosi in un determinato senso, ad esempio aumentando, e vi è un altro, che succede al primo, in cui la pressione ritorna in condizione d'equilibrio muovendosi in senso opposto, cioè diminuendo. A questi momenti corrispondono le *fasi* della vibrazione, che si alternano nel tempo, sia da una parte che dall'altra della posizione d'equilibrio. Ciascuna fase inizia nell'istante in cui il valore della pressione si allontana dalla posizione di equilibrio per raggiungere in un verso il suo massimo e termina col ritorno della pressione al valore di equilibrio; qui però la variazione di pressione non si arresta e, con la ripetizione del fenomeno in senso inverso, inizia la fase successiva. In generale ogni vibrazione comprende due fasi, che si usa distinguere con *positiva* e *negativa*.

Ogni suono complesso può essere rappresentato come somma di onde sinusoidali di ampiezze, frequenze e fasi diverse, ciascuna delle quali si chiama *componente* dell'onda. Quindi, per quanto complicata possa essere l'onda sonora in esame, possiamo considerarla come il risultato della composizione di molte onde sinusoidali indipendenti e senza influenza reciproca, che si comportano come se ciascuna si riproducesse da sola e fosse la sola a propagarsi.

A conferma di ciò si può dimostrare sperimentalmente che il *timbro* di un suono complesso è determinato dalle frequenze sinusoidali che lo compongono. L'insieme delle ampiezze delle onde sinusoidali componenti un qualsiasi suono, in un determinato intervallo di tempo, viene detto *spettro sonoro;* il procedimento matematico utilizzato per questa analisi è detto *analisi armonica* di Fourier. Consideriamo il diagramma di un'onda sonora complessa (fig. I.3 a), in cui è riportato il modo in cui varia la pressione al variare del tempo, sia dell'onda complessa sia delle sue componenti.

Le onde sinusoidali che compongono l'onda sonora sono dette *componenti armoniche* o più semplicemente *armoniche.* Lo spettro dell'onda sonora di fig. I.3 a viene rappresentato mediante un diagramma in cui in ordinate vengono riportati i valori delle ampiezze

delle componenti ed in ascisse il valore delle rispettive frequenze (fig. I.3 b).

Il periodo della prima armonica $T = 1/f$ coincide con il periodo dell'onda in esame, mentre la seconda armonica (che non esiste per il segnale in figura) ha periodo metà, ovvero frequenza doppia della fondamentale; la terza armonica ha periodo un terzo, cioè frequenza

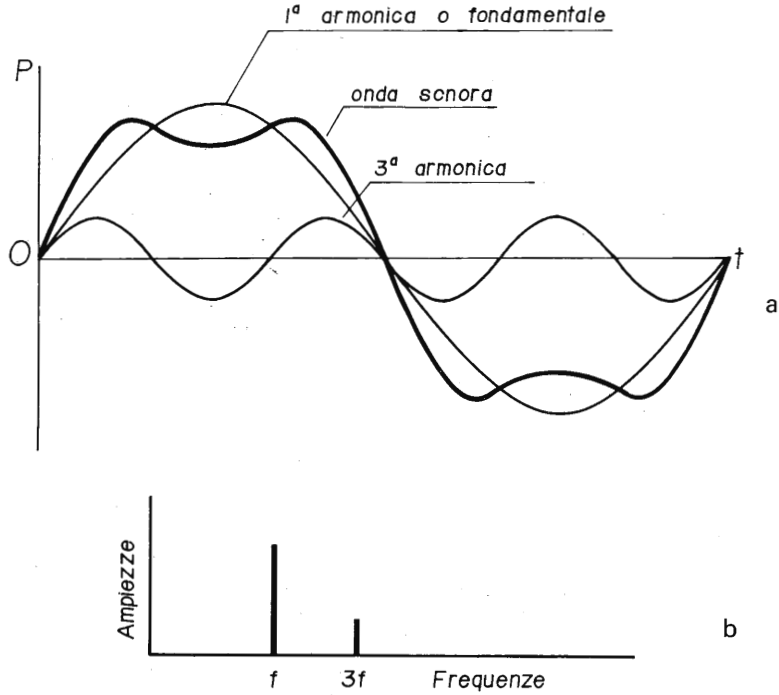


Fig. I.3 - Onda sonora e sue componenti (a); *spettro sonoro* (b).

tripla della fondamentale. Inoltre il valore dell'ampiezza dell'onda in esame, in un determinato istante, è dato dalla somma dei valori delle ampiezze delle armoniche in quell'istante. Nella analisi di Fourier le fasi relative delle armoniche hanno un ruolo importante. A tale scopo analizziamo contemporaneamente l'onda complessa e le armoniche illustrate in fig. I.3 a. Qui vediamo che le armoniche sono in fase, dato che a fasi iniziali della prima armonica, o fondamentale, corri-

spondono le stesse fasi iniziali dell'altra armonica. Consideriamo ora le stesse armoniche quando non vi sia coincidenza di fase iniziale (fig. I.4 a).

Come si nota, non cambia lo spettro sonoro, però l'onda risultante, pur avendo le stesse armoniche, ha forma completamente diversa. Lo sfasamento viene misurato in gradi mediante la relazione $360° \cdot \frac{t}{T}$, dove t è il ritardo o l'anticipo di tempo fra le frequenze in esame, T è il periodo della frequenza di riferimento.

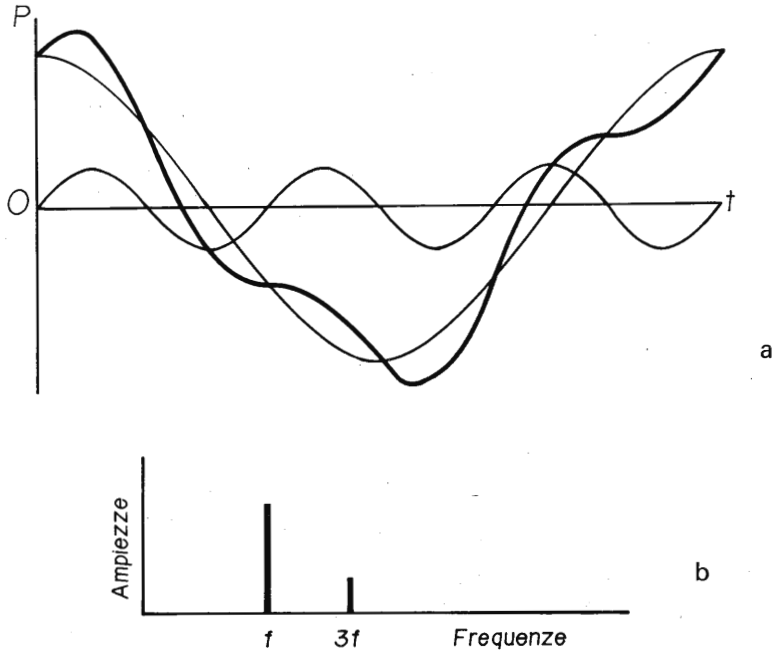


Fig. I.4 - Onda sonora complessa e onde sinusoidali componenti non in fase (a); *spettro sonoro* (b).

Riassumendo: una vibrazione complessa si può esprimere come somma di un certo numero di vibrazioni sinusoidali con determinate ampiezze, frequenze e fasi; dette vibrazioni sinusoidali sono chiamate armoniche. L'insieme delle ampiezze e delle frequenze delle rispettive armoniche costituisce lo spettro della vibrazione complessa.

I.3. Riflessione ed interferenza delle onde sonore; il tempo di riverberazione

Se si considera un impulso di un'onda sonora sinusoidale che si propaga nello spazio senza incontrare ostacoli, si nota che l'onda nel corso della sua propagazione si smorza a causa degli attriti provocati dalla natura del mezzo di propagazione.

Lo spazio in cui si propaga l'onda è, quasi sempre, di limitate dimensioni, con confini che in generale modificano il comportamento della propagazione.

Quando un'onda sonora incontra un ostacolo, sia esso rigido, cioè incapace di vibrare, oppure che riesca a trasmettere le onde in modo diverso da quello del mezzo circostante, l'onda sonora si riflette ritornando verso il punto di partenza. Se, come spesso avviene, la sorgente sonora emette onde in continuazione, nello spazio si determinerà una situazione di vibrazioni molto complessa, formata da onde dirette e riflesse coesistenti fra loro.

Il fenomeno della riflessione acquista, quindi, un'importanza primaria per ciò che concerne la riproduzione dei suoni.

Se in un punto dello spazio coesistono più onde che agiscono separatamente ma contemporaneamente, sulle molecole d'aria si sommano i loro effetti, dando luogo al fenomeno di *interferenza.*

A tale proposito consideriamo il movimento delle particelle d'aria in un dato punto dello spazio soggetto contemporaneamente all'effetto di due o più onde sonore che si propagano nella stessa direzione o in direzione opposta. Per poter seguire meglio il fenomeno, consideriamo due sole onde. Anzitutto si deve rilevare che due onde progressive non si disturbano propagandosi nel mezzo, tuttavia il moto di vibrazione delle particelle d'aria, causato dalle due onde, è la risultante della duplice sollecitazione. Ciò significa che se le due onde si incontrano in *condizione di fase*, si avrà un proporzionale aumento dell'ampiezza del moto vibratorio dell'aria con un conseguente aumento di pressione sonora; mentre se l'incontro avviene quando un'onda è in fase positiva e l'altra in quella negativa, incontro in *opposizione di fase*, la risultante dei due effetti sarà una diminuzione di ampiezza del moto vibratorio dell'aria, con conseguente diminuzione di pressione sonora, poiché all'azione che una delle due onde esercita in un verso si oppone l'azione dell'altra, che viene esercitata in verso contrario.

La riflessione e l'interferenza di onde danno luogo al fenomeno delle *onde stazionarie*. Anche per la descrizione delle onde stazionarie, ci serviremo di onde sinusoidali. Consideriamo un ambiente limitato; in seguito all'impulso della sorgente sonora primaria si ge-

nerano vibrazioni che, partendo dal punto di origine, si propagano, si riflettono sugli ostacoli rigidi che delimitano l'ambiente, invertendo di fase. Se l'eccitazione sonora è continua, ad un certo istante le onde provenienti dalle opposte direzioni s'incontrano sommando i loro effetti senza disturbarsi. Si avranno così con alternanza periodica, derivata dalla stessa periodicità delle onde, somme di effetti dello stesso segno e somme di effetti di segno contrario. Alla riflessione e all'interferenza fra onde sonore sono legati i fenomeni di *eco, rimbombo* e *riverberazione.*

L'eco è l'effetto di un'onda sonora riflessa, percepibile distintamente da quello prodotto dall'onda diretta. Perché l'audizione del fenomeno possa avvenire occorre che la durata del percorso di andata e ritorno effettuato dalla vibrazione acustica sia superiore a 0,1 s; ciò a causa del tempo che ogni suono sembra permanere nell'orecchio, persistenza valutata proprio in 0,1 s. Così le due impressioni sonore, prodotte rispettivamente dall'onda diretta e dall'onda riflessa, non si fonderanno, permettendo la percezione dell'eco. Poiché la velocità del suono è circa 340 m/s, risulta che in 0,1 s l'onda percorrerà 34 m, quindi, per rilevare il fenomeno d'eco, la superficie riflettente non potrà essere distante meno di 17 m dalla sorgente nei cui pressi è situato anche il punto di ascolto.

Vogliamo segnalare che esistono anche effetti di eco multipla che si hanno quando la situazione è caratterizzata da combinazioni di superfici riflettenti opportunamente disposte nello spazio; si ricordi ad esempio l'eco udibile nelle stanze, se pur piccole, prive di arredi.

I fenomeni di eco e di riverberazione danno luogo al rimbombo. Il rimbombo è caratterizzato da effetti di ampliamento caotico del suono, dove riflessioni fra superfici, anche lontane fra loro, producono effetti acustici negativi. Possiamo considerare, come esempio, l'effetto sonoro prodotto da un treno in una galleria.

Per quanto l'effetto sonoro possa essere caoticamente ampliato, bisogna tener presente che l'energia sonora inerente al fenomeno è quella prodotta dalla sorgente primaria; l'effetto di sensazione di ampliamento è dovuto alla concentrazione, riflessione, diffusione delle onde sonore e alla grande sensibilità dell'orecchio.

L'effetto più importante, per l'ascolto della musica, dovuto alla riflessione delle vibrazioni acustiche, è la riverberazione; dalle caratteristiche della riverberazione dipende la buona riuscita acustica di un auditorio. La riverberazione consiste nella persistenza del suono dopo che la sorgente abbia cessato di agire. La durata della persistenza sonora è detta *tempo di riverberazione*; questo tempo dipende dalla struttura delle superfici riflettenti, pareti ed arredamenti. Secondo la struttura delle superfici riflettenti, il tempo di riverberazione

può oscillare fra zero e valori di qualche secondo (5 - 10 s). Gli ambienti con tempo di riverberazione nullo sono detti *camere anecoiche;* sono ambienti più o meno grandi, con pareti, pavimenti e soffitto imbottiti di materiale assorbente che simulano le condizioni di propagazione del suono nella totale assenza di qualsiasi riflessione. Per contro gli ambienti con alto tempo di riverberazione sono detti *camere riverberanti;* essi hanno pareti altamente riflettenti e geometria molto simmetrica, come cubi e sfere; tali ambienti vengono usati per indagini acustiche.

Perché un ambiente abbia una buona caratteristica di riverberazione, occorre che non vi sia presenza di eco, poiché nel riverbero non deve esserci distacco di tempo tra l'effetto diretto e quello riflesso. Ogni esigenza di ascolto del suono comporta soluzioni particolari per quanto riguarda le caratteristiche di riverberazione; così un auditorio ottimo per esecuzioni musicali può non esserlo per ciò che riguarda recitazioni di prosa.

Per quanto riguarda la misurazione del tempo di riverberazione, occorre stabilire a quale punto del decremento di pressione sonora deve essere fissato il limite della misurazione. Il tempo standard di riverberazione è quello necessario affinché la pressione sonora esistente nell'ambiente all'istante in cui la sorgente sonora cessa di agire si sia ridotta ad un milionesimo del valore iniziale. Inoltre il tempo di riverberazione adatto all'uso a cui è destinata la sala viene misurato per tutte le frequenze che compongono il campo di udibilità (16 - 16.000 Hz).

Fig. I.5 - Battimenti risultanti dalla composizione di due onde sinusoidali di frequenza leggermente diversa.

La coesistenza di due onde sonore produce il fenomeno dei *battimenti*; questo è dovuto all'emissione di onde sonore di frequenza leggermente diversa da parte di sorgenti indipendenti. Considerando due suoni sinusoidali le cui frequenze hanno valore: $f_1 = 1.115$ Hz ed $f_2 = 1.000$ Hz, sovrapponendo le due oscillazioni e sommando le relative ampiezze si ottiene un nuovo oscillogramma corrispondente ad un nuovo suono, come illustrato in fig. I.5, in cui è visibile la varia-

zione dell'ampiezza; queste fluttuazioni, cui è stato dato il nome di battimento, hanno frequenza pari alla differenza tra le frequenze generatrici. Quando due frequenze comprese fra 200 e 1.500 Hz entrano in battimento, e il numero di questi non supera cinque o sei unità al secondo, l'effetto di sensazione sonora è piacevole; tale sensazione può essere riscontrata nell'ascolto dell'organo quando viene inserito uno speciale registro costituito da varie coppie di canne accordate su frequenze leggermente diverse, ottenendo l'effetto chiamato *registro di voce celeste.*

I.4. I livelli acustici e loro unità di misura

Nelle misure inerenti l'analisi acustica di un ambiente è di fondamentale importanza il *decibel* (simbolo dB). Con questa unità si misurano il livello acustico di pressione, di potenza, di intensità. Le unità classiche di pressione quali N/m^2 o $dine/cm^2$ sono poco comode.

Il *livello di pressione acustica* è una grandezza espressa mediante il logaritmo in base dieci del rapporto tra la pressione acustica ed una pressione di riferimento, ed è espressa dalla relazione

$$SPL = 20 \text{ Log } P/P_o$$

con SPL: livello di pressione acustica in esame (Sound Pressure Level);
P : pressione acustica dell'onda sonora in esame;
P_o : pressione acustica di riferimento pari a 0,00002 N/m^2.

Il *livello di potenza acustica* è una grandezza espressa mediante il logaritmo in base dieci del rapporto tra la potenza acustica di una sorgente (cioè l'energia sonora liberata nell'unità di tempo dalla sorgente) e la potenza di una sorgente campione; è espressa dalla relazione

$$WL = 10 \text{ Log } W/W_o$$

con WL: livello di potenza acustica in esame;
W : potenza acustica della sorgente in esame;
W_o : potenza acustica della sorgente di riferimento pari a 10^{-12} W.

Il livello della potenza acustica di una sorgente caratterizza il suono emesso, mentre quello della pressione acustica caratterizza il suono percepito dall'orecchio.

L'*intensità acustica* è la concentrazione d'energia per unità di superficie d'onda sonora; essa è legata alla pressione acustica dalla relazione

$$I = p^2/2\,\rho\, v \qquad (1)$$

con p: pressione acustica;

ρ: densità dell'aria pari a 1,3 kg/m^3;

v: velocità del suono pari a 344 m/s.

L'intensità acustica si misura in W/cm^2.

Il *livello d'intensità acustica* è una grandezza espressa mediante il logaritmo in base dieci del rapporto tra l'intensità acustica dell'onda sonora in esame e l'intensità acustica di un'onda sonora di riferimento, ed è espressa dalla relazione

$$IL = 10 \text{ Log } I/I_o$$

con IL: livello d'intensità acustica;

I : intensità acustica dell'onda sonora in esame;

I_o : intensità acustica dell'onda sonora di riferimento pari a $10^{-16} \frac{W}{cm^2}$.

Dalle definizioni di livello, si nota sempre la presenza di un rapporto. Questo perché di solito si giudica l'intensità relativa dei suoni in base ai rapporti più che alle differenze tra le loro potenze. Si giudica, ad esempio, un fischio appena più forte oppure il doppio più forte di un altro, e si esprime quasi esattamente lo stesso giudizio sia quando i fischi provengono da lontano e sembrano deboli, sia quando provengono da vicino e sembrano forti. Così una certa differenza di potenza, trascurabile se si paragonano due suoni forti, può diventare importante se si paragonano due suoni deboli. Chi non abbia dimestichezza con i logaritmi può utilizzare il diagramma di fig. I.6.

Per avere un'idea dei livelli di pressione sonora espressi in dB, nel campo dei suoni musicali, si riportano i dati SPL tipici rilevati ad una distanza di 2,5 m in ambiente riverberante:

Strumenti orchestrali:

pianissimo orchestrale sounato da violini, flauti, fagotti: 55-60 dB;

fortissimo orchestrale suonato da violini, flauti, fagotti: 70-75 dB;

pianissimo orchestrale suonato da trombe e tube: 75 dB;

fortissimo orchestrale suonato da trombe e tube: 90 dB;

dinamica del flauto: 35-42 dB minimo, 77 dB massimo;
dinamica del corno francese: 43-50 dB minimo, 93 dB massimo;
dinamica del grande organo: 45-55 dB minimo, 100 dB massimo;
fortissimo di gran cassa: 100-120 dB;
fortissimo del triangolo: 70-80 dB.

Livelli sonori tipici prodotti da orchestra di 75 componenti ad una distanza di 5 m:

dinamica 85-115 dB.

(Per dinamica di una sorgente sonora si intende la differenza fra i valori massimo e minimo di SPL prodotti dalla sorgente).

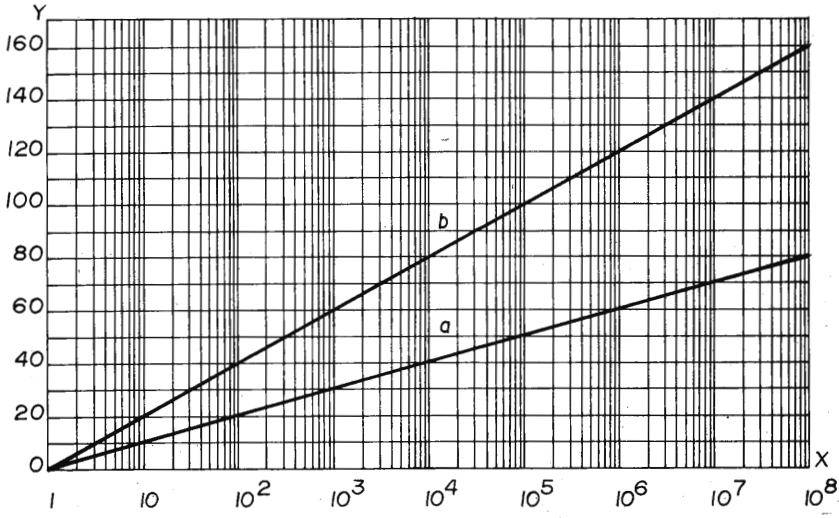


Fig. I.6 - In a) *è rappresentato il diagramma di* $y = 10 \text{ Log } x$; *in* b) *il diagramma di* $y = 20 \text{ Log } x$.

I.5. Misure dei livelli acustici in un ambiente d'ascolto

Come si è potuto notare, per i livelli acustici sono stati riportati alcuni esempi di suoni riferiti alla sensazione dell'ascolto senza fare alcuna distinzione fra i suoni; l'orecchio e il cervello, però, interpretano le pressioni sonore dando loro un'importanza diversa a seconda che le frequenze siano *gravi, medie* o *acute.*

Per determinare e utilizzare tale classificazione, conviene suddividere la banda di frequenze udibili; la suddivisione è chiamata *suddivisione per ottava.* Si chiama *ottava* l'intervallo fra due frequenze che stanno in rapporto 2 : 1. Le analisi del suono più comuni si fanno in ottava. Ogni intervallo di frequenze è individuato dalla sua frequenza media; l'intervallo d'ottava 125 Hz, ad esempio, ha come frequenza media 125 Hz. Le frequenze in ottava normalizzate sono:

16 - 31,5 - 63 - 125 - 250 - 500 - 1.000 - 2.000 - 4.000 - 8.000 - 16.000.

Analisi acustiche più dettagliate vengono eseguite con frequenze a terzo d'ottava. Tali frequenze sono:

16 - 20 - 25 - **31,5** - 40 - 50 - **63** - 80 - 100 - **125** - 160 - 200 - **250** - 315 - 400 - **500** - 630 - 800 - **1.000** - 1.250 - 1.600 - **2.000** - 2.500 - 3.150 - **4.000** - 5.000 - 6.300 - **8.000** - 10.000 - 12.500 - **16.000.**

Le frequenze a terzo d'ottava normalizzate si ricavano dalle frequenze ad ottava aggiungendo altre due frequenze che si trovano a circa un terzo, per la prima, e a due terzi per la seconda, dell'intervallo d'ottava. Così, tra 16 e 31,5 Hz, l'intervallo d'ottava è di 15,5 Hz; le due frequenze supplementari sono a 21,1 e a 26,33 Hz, ma i valori normalizzati usati sono a 20 e a 25 Hz. Analoga procedura si segue per gli altri intervalli.

Mediante le fasce a terzo d'ottava, per l'acustica ambientale si considerano le frequenze:

16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100 - 125 - 160 - 200 - 250 - 315 quali frequenze gravi;

400 - 500 - 630 - 800 - 1.000 - 1.250 - 1.600 quali frequenze medie;

2.000 - 2.500 - 3.150 - 4.000 - 5.000 - 6.300 - 8.000 - 10.000 - 12.500 - 16.000 quali frequenze acute.

Le misure dei livelli acustici vengono eseguite mediante apparecchiature chiamate *fonometri* o più precisamente *misuratori di livello sonoro* (fig. I.7).

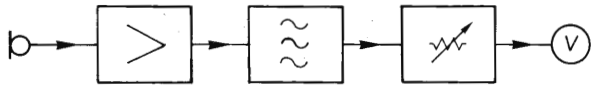


Fig. I.7 - Schema a blocchi del fonometro.

Il fonometro è costituito essenzialmente: da un microfono che trasduce le vibrazioni delle particelle d'aria dovute al suono in corrispondenti segnali elettrici; da un apparato amplificatore che contiene dei circuiti elettrici (detti filtri), atti a rendere il fonometro misuratore delle sensazioni sonore corrispondenti ai livelli acustici percepiti dall'orecchio; da uno strumento indicatore, con scale tarate in dB, per la valutazione quantitativa del livello sonoro.

I filtri contenuti nei circuiti di amplificazione del fonometro sono dispositivi adoperati per selezionare dati tipi di segnali, mediante conveniente attenuazione delle frequenze componenti i segnali non desiderati, e lasciando inalterate quelle frequenze componenti i segnali che si vogliono selezionare. Così, azionando i filtri, si determinano delle curve dette *curve di ponderazione* come illustrato in fig. I.8.

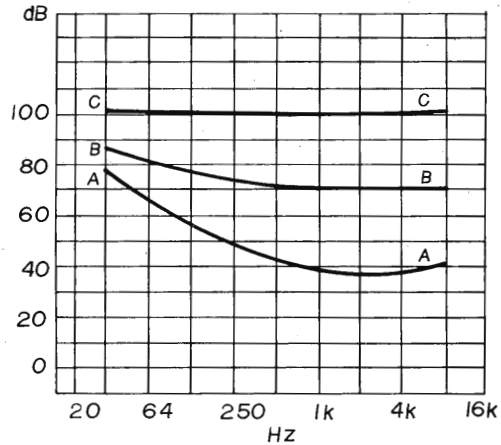


Fig. I.8 - Curve di ponderazione.

Ovviamente i filtri possono essere esclusi, allora il fonometro dà la misura dei livelli sonori in modo lineare. Le curve di ponderazione, secondo le norme internazionali IEC, vengono contrassegnate con le lettere A - B - C rispettivamente. La curva *A-A* (vedi figura) corrisponde al comportamento dell'orecchio ai livelli bassi, la curva *B-B* corrisponde al comportamento dell'orecchio ai livelli medi, la curva *C-C* corrisponde al comportamento dell'orecchio ai livelli alti. La correzione corrisponde sensibilmente alle curve isofoniche per l'orecchio passanti, per 1.000 Hz, rispettivamente: a 40 dB per la curva *A-A,* a 70 dB per la curva *B-B,* a 100 dB per la curva *C-C.* (Delle curve isofoniche parleremo nel capitolo terzo).

Quando si misura un suono complesso, il microfono del fonometro capta tutta l'energia sonora indipendentemente dalle frequenze dei suoni che lo compongono e quindi il risultato è espresso da una sola cifra che dà il *livello globale* del suono secondo la posizione del filtro; perciò suoni aventi spettri differenti possono avere lo stesso livello globale. Se si vuole misurare il livello di ogni singola frequenza componente lo spettro di un suono, occorre utilizzare apparecchiature chiamate *spettrometri,* molto più complesse del semplice fonometro.

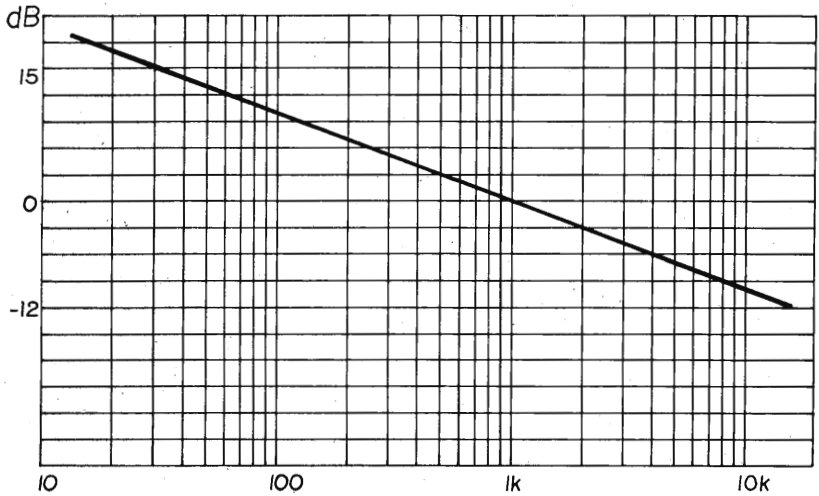


Fig. 1.9 - Rumore rosa.

Nonostante le limitazioni del fonometro per ciò che concerne lo spettro sonoro, esso può essere utilizzato efficacemente per l'analisi acustica di piccoli ambienti (per piccoli ambienti intendiamo quelli che hanno una cubatura inferiore a 300 m^3).

Scegliamo, ad esempio, un ambiente d'ascolto costituito da un normale soggiorno in cui è inserito un complesso Hi-Fi stereo costituito da: giradischi, amplificatore, due diffusori acustici; considerando questo impianto come sorgente ottimale, vogliamo misurare i livelli sonori prodotti. A tale scopo utilizziamo: dischi stereofonici a 33 giri che riportano inciso un programma basato su *rumore rosa* filtrato a 1/3 d'ottava conforme alle norme internazionali IEC R 98, un fonometro attrezzato con un microfono a condensatore capace di captare frequenze comprese fra 20 e 20.000 Hz, della carta su cui tracciare lo spettro sonoro del rumore rosa.

Aver scelto come sorgente sonora il rumore rosa filtrato è dovuto al fatto che il risultato delle misure fatte con il fonometro è in accordo con il risultato ottenuto con test d'ascolto, eseguiti con procedure molto più elaborate.

Il rumore rosa è generato in modo casuale da apparati elettronici; è composto da tutte le frequenze udibili costituenti uno spettro sonoro con livelli inversamente proporzionali alla frequenza; ne viene una retta con pendenza — 3 dB per ottava, come illustrato nel diagramma di fig. I.9, in cui, partendo dalla frequenza di 16 Hz, per ogni ottava il livello diminuisce di 3 dB (pendenza di — 3 dB/ott.).

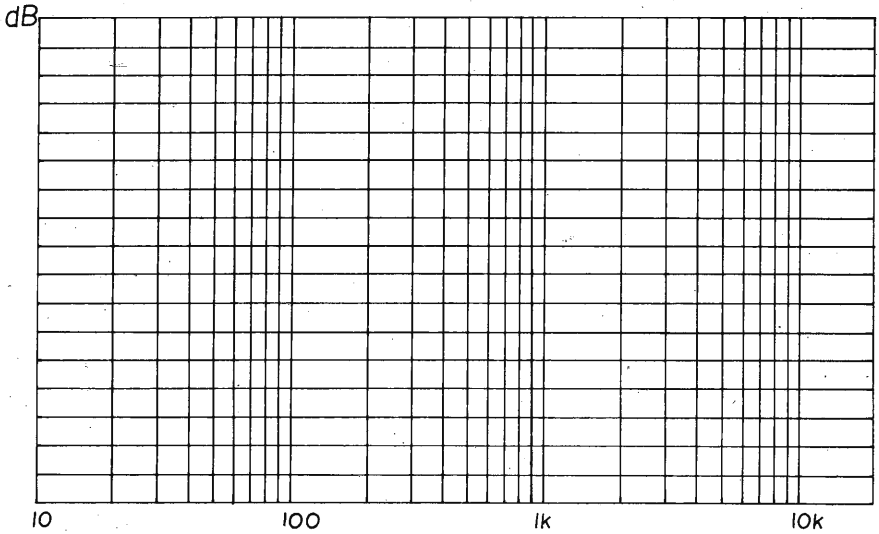


Fig. I.10 - Grafico utilizzato per l'analisi acustica.

Il procedimento di massima per la misura è il seguente:

1) Si traccia su un foglio un grafico come riportato in fig. I.10.
2) Si dispone sul giradischi il disco portante inciso il rumore rosa, si pongono i controlli di tono in posizione lineare (flat).
3) Si riportano sul grafico i valori letti con il fonometro.

Se l'ambiente d'ascolto non altera l'informazione, il diagramma ottenuto avrà andamento come illustrato in fig. I.11.

Vi sono alcune considerazioni riguardanti il procedimento di misura descritto. In primo luogo si è supposto il complesso Hi-Fi come ottimale e si è omesso di considerare l'esistenza di una interazione

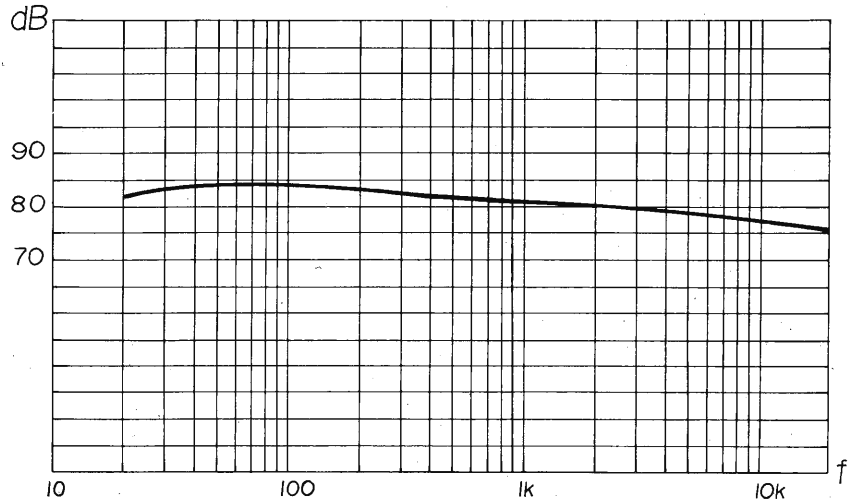


Fig. I.11 - Diagramma fonometrico relativo all'analisi acustica di un ambiente ideale.

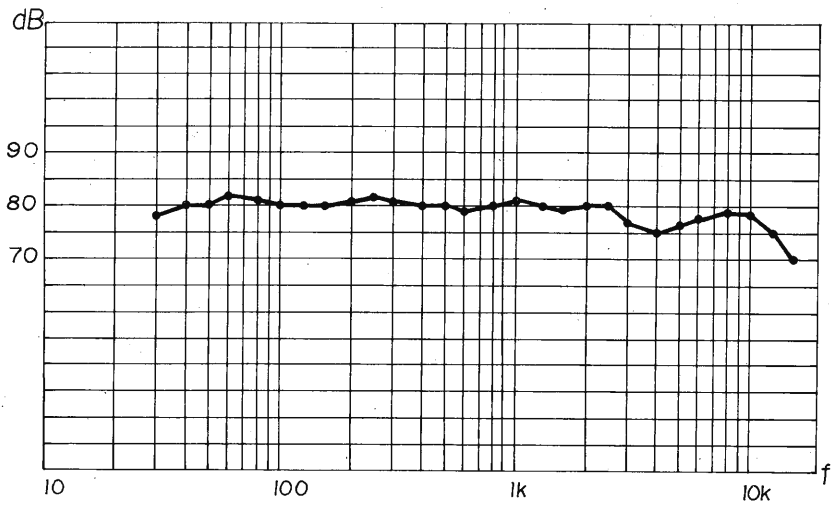


Fig. I.12 - Diagramma fonometrico di un ambiente reale.

fra ambiente e sorgente e più precisamente fra diffusori acustici ed ambiente; non si è discusso delle posizioni reciproche fra diffusori e microfono del fonometro, posizioni che influenzano sensibilmente lo andamento della curva. Riguardo il diagramma di fig. I.11, si fa presente che questo si riferisce a un ambiente ideale per l'ascolto. Un esempio reale di diagramma fonometrico di un ambiente, che può essere considerato acusticamente buono, è riportato in fig. I.12.

I.6. Misura del tempo di riverberazione di un ambiente d'ascolto

Le onde sonore prodotte da piccole sorgenti che si propagano nello spazio libero distribuiscono la loro energia, all'allontanarsi dalla sorgente, su superfici sferiche sempre più grandi; ciò comporta una diminuzione del livello di intensità acustica.

Invece, in uno spazio limitato, quale un ambiente d'ascolto costituito da un soggiorno, quando un'onda sonora incontra una parete si hanno contemporaneamente la riflessione di una parte dell'energia dell'onda e l'assorbimento della rimanente energia da parte della parete, dipendentemente dalla sua natura. Ciò è analogo a quello che accade all'energia di una palla di gomma lanciata contro una parete: una parte dell'energia cinetica della palla viene assorbita e si trasforma in calore, la rimanente determina il rimbalzo (riflessione); l'assorbimento d'energia ed il rimbalzo dipendono, oltre che dall'energia posseduta dalla palla, anche dalla natura della parete; più la parete è rigida, maggiore sarà il rimbalzo e minore l'assorbimento.

Il livello acustico che si stabilisce in un ambiente chiuso è dovuto alla sovrapposizione del suono emesso direttamente dalla sorgente e da quello riflesso dalle pareti del locale. Se la natura delle pareti è molto riflettente, si dice che il locale è *molto riverberante*; se troppo assorbente, si dice che il locale è *sordo*; in entrambi i casi il suono prodotto è sgradevole, di conseguenza si deve dosare il rivestimento delle pareti in modo da rendere il locale giustamente sonoro.

Per determinare la sonorità di un locale occorre misurare il tempo di riverberazione. Ricordiamo che la rilevazione del tempo di riverberazione consiste nel misurare la durata affinché la pressione sonora esistente nell'ambiente all'istante in cui la sorgente cessa di agire, si sia ridotta ad un milionesimo del valore iniziale, cioè si sia ridotta di 60 dB.

Per la rilevazione si usano apparecchiature alquanto complesse e costose (fig. I.13). Esse sono: un generatore di segnali sinusoidali modulati in frequenza il cui spettro è simile a quello del rumore rosa precedentemente descritto, un analizzatore di spettro (spettrometro),

un registratore di livello corredato di apparato scrivente, un microfono a condensatore, un amplificatore di potenza, un altoparlante.

Il generatore di segnali, precedentemente predisposto e collegato all'altoparlante mediante l'amplificatore di potenza, ad intervalli di tempo stabiliti immette nel locale un segnale centrato sulla banda d'ottava desiderata; il segnale viene captato dal microfono, viene filtrato dallo spettrometro e registrato dall'apposito registratore. Tutti gli strumenti sono sincronizzati mediante comandi elettronici di cui gli stessi strumenti sono provvisti. Al termine della misura si possono osservare sulla carta registratrice dei diagrammi per le varie frequenze; poi, mediante uno speciale goniometro, in funzione della pendenza del diagramma si ricava il tempo di riverberazione espresso in secondi.

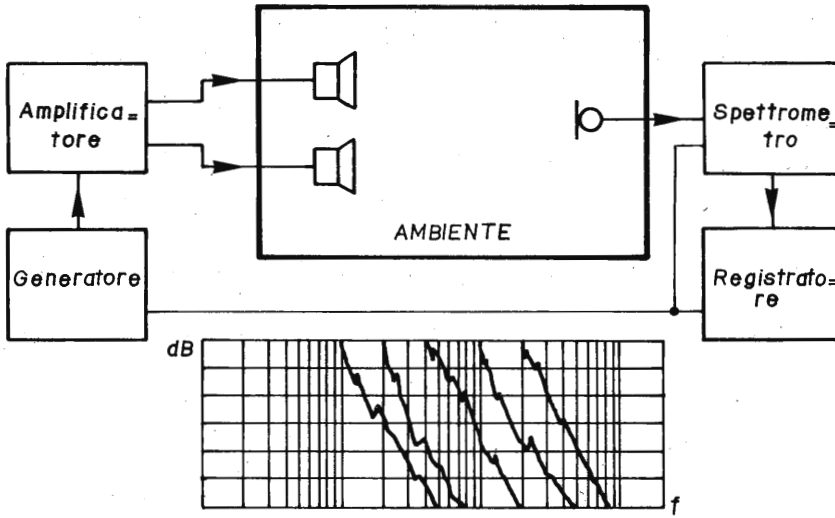


Fig. I.13 - Rilevazione del tempo di riverberazione.

Vi è un modo meno preciso, però economico, per determinare il tempo di riverberazione. La modalità è basata, essenzialmente, su calcoli. Elemento chiave è il *coefficiente di assorbimento* α che caratterizza l'energia sonora assorbita da parte di un materiale, ed è espresso dalla relazione:

$$\alpha = \frac{\text{energia sonora incidente sul materiale in esame}}{\text{energia sonora assorbita dal materiale in esame}}$$

I materiali non assorbono nello stesso modo i suoni gravi, medi ed acuti, e perciò si deve sempre indicare il loro coefficiente d'assorbimento in funzione della frequenza; in genere α è misurato per frequenze espresse in ottava e precisamente per le frequenze 125 - 250 - 500 - 1.000 - 2.000 - 4.000 Hz.

Il coefficiente di assorbimento viene usato per determinare *l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente d'ascolto A.* Vediamo con un esempio in cosa consiste. Se un materiale ha un coefficiente d'assorbimento $\alpha = 0{,}5$ a 2.000 Hz, significa che 1 m^2 di quel materiale si comporta come una superficie completamente assorbente di 0,5 m^2; si dice allora che 0,5 m^2 è l'area equivalente A di un metro quadrato di materiale soggetto a un suono di 2.000 Hz. L'area A di assorbimento equivalente dell'ambiente d'ascolto è data dalla somma delle aree equivalenti delle superfici delle pareti, degli arredi, degli oggetti in questa contenuti. Possiamo esprimere A con la seguente relazione:

$$A = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_3 \alpha_3 + \ldots + S_n \alpha_n = \sum_{i=1}^{n} S_i \alpha_i$$

con S_i superficie del materiale in esame; α_i coefficiente di assorbimento del materiale ad una determinata frequenza. (A è detto anche unità assorbente della superficie S_i ed è espresso in m^2).

Il calcolo del tempo di riverberazione può farsi semplicemente mediante la relazione ottenuta sperimentalmente da Sabine:

$$T = 0{,}16 \times \frac{V}{A}$$

con V volume dell'ambiente.

La formula è valida per ambienti piccoli e quando il rivestimento è distribuito in modo omogeneo, condizioni non facilmente realizzabili in ambienti d'ascolto casalinghi. Per tener conto di questa limitazione, è opportuno ridurre del 10 % i valori dei coefficienti dei materiali assorbenti o i valori delle unità assorbenti. Sulla formula di Sabine sono basate anche le norme di misura dei coefficienti d'assorbimento dei materiali.

CAPITOLO SECONDO

LA CORREZIONE ACUSTICA DELL'AMBIENTE DI ASCOLTO

Nel XVIII secolo gli architetti dei più noti teatri dell'opera avevano trovato soluzioni architettoniche, ancor oggi valide, per far percepire agli ascoltatori un suono piacevole. Le soluzioni ideate furono: un adeguato volume della sala d'ascolto, la platea a ferro di cavallo, i palchi, le gallerie, gli stucchi, i tendaggi, le strutture in legno, la forma della scena.

Anche l'ambiente casalingo può essere adattato in modo da ottenere un ascolto piacevole quale si può recepire in un teatro dell'opera.

II.1. L'acustica dell'ambiente

La formula di Sabine, definendo il tempo di riverberazione di un ambiente in funzione del volume, non tiene conto di altri elementi caratteristici per l'intellegibilità del suono e legati al tempo di riverberazione. Questi elementi sono le dimensioni e la forma del locale d'ascolto; da queste dipende l'esistenza e la formazione di sistemi di onde stazionarie, a cui corrispondono delle frequenze che sono chiamate *frequenze di risonanza* o *frequenze proprie dell'ambiente.* La rivelazione di queste frequenze viene eseguita immettendo nell'ambiente segnali sonori in regime sinusoidale e misurando con un fonometro il corrispondente livello sonoro; se le frequenze di risonanza sono distanziate l'una dall'altra, si manifesta una disuniformità di distribuzione di energia sonora al variare della frequenza; l'addensamento delle frequenze proprie di un ambiente, con forma abbastanza simile a un parallelepipedo come la maggior parte degli ambienti casalinghi, può essere valutato dalla relazione:

$$\Delta N = 3 \times 10^{-7} \times f_o^2 \times \Delta f \times V$$

dove ΔN, arrotondato a numero intero, è la quantità delle frequenze di risonanza comprese nell'intervallo di frequenza Δf, nell'intorno della frequenza f_o, per un ambiente di volume V.

Facciamo un esempio: una sala ha dimensioni $Z = 3{,}1$ m; $Y = 3{,}9$ m; $X = 5$ m; il suo volume è $V = 60{,}45$ m^3; consideriamo un in-

tervallo di frequenza Δf di 20 Hz, ed f_o corrispondente alle frequenze d'ottava; ΔN risulta:

f_o	16	32	64	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000
ΔN	0	0	1	6	23	91	363	1.451	5.803	23.213	92.851

Come si noterà, nell'intervallo considerato si ha un marcato distanziamento delle frequenze di risonanza nella regione delle frequenze gravi, mentre nella regione delle frequenze medie ed acute il distanziamento diminuisce, ottenendo così condizioni migliori per l'ascolto. La relazione, inoltre, mostra che il distanziamento si accentua quanto più il volume dell'ambiente è piccolo.

In una sala parallelepipeda di dimensioni X, Y, Z, espresse in metri, le frequenze proprie si calcolano con la formula:

$$f_o = 172 \cdot \sqrt{(a/X)^2 + (b/Y)^2 + (c/Z)^2} \qquad (1)$$

con a, b, c, numeri interi qualsiasi di cui almeno uno diverso da zero. Ad ogni terna corrisponde un modo di oscillazione, così il modo (1,0,0) corrisponde alla formazione di onde stazionarie nella direzione parallela alla dimensione (maggiore) X. Facciamo osservare che, col crescere dei valori a, b, c, anche le frequenze di risonanza assumono valori crescenti e si addensano sempre più, sicché i corrispondenti picchi di risonanza della pressione acustica tendono a sovrapporsi e a confondersi; in pratica, tuttavia, l'addensamento delle frequenze di risonanza in un determinato ambiente non cresce con regolarità: a bande di frequenza nelle quali l'addensamento è maggiore possono alternarsi altre aventi un addensamento relativamente minore.

Applichiamo la (1) all'ambiente preso precedentemente come esempio per le seguenti terne:

a	b	c	f_0 (Hz)	a	b	c	f_0 (Hz)
0	0	1	54	1	3	0	137
0	0	2	111	2	0	0	69
0	1	0	44	2	0	2	129
0	1	1	71	2	1	1	99
0	1	3	172	2	1	2	137
0	2	0	88	2	2	0	114
0	2	2	142	2	2	1	126
0	2	3	187	2	2	2	157
1	0	0	34	3	0	1	117
1	0	1	64	3	0	2	150
1	1	0	57	3	1	0	113
1	2	1	111	3	2	0	136
1	2	2	146	...	...	...	....

La distribuzione dei modi di oscillazione di un ambiente lungo la scala delle frequenze serve a determinare la scelta delle proporzioni ottimali di piccoli ambienti; la condizione ottimale di forma parallelepipeda si ha quando le tre dimensioni non stanno tra loro in rapporti semplici e in particolare quando non sono multipli interi l'una dell'altra. I rapporti 1 : 1,25 : 1,6 per piccoli ambienti e 1 : 1,6 : 2,6 per quelli più ampi, dovuti al Major, sono considerati ideali; questi rapporti, fissata l'altezza (dimensione Z), danno le altre due dimensioni: per il primo rapporto si ha $Y = 1{,}25Z$ $X = 1{,}6Z$; per il secondo $Y = 1{,}6Z$ $X = 2{,}6Z$. Vediamo in che misura il fenomeno di risonanza può influire seriamente sulla qualità di riproduzione.

Le frequenze di risonanza ben distanziate, nella regione delle basse frequenze, sono quelle che una volta innescate in modo efficace, condizione raggiunta quando la sorgente eroga una quantità di energia tale da superare gli effetti di assorbimento dovuti ai materiali presenti nell'ambiente, danno luogo ad una eccessiva accentuazione (colorazione) delle note basse, specie degli strumenti ad arco a registro basso (contrabbassi e violoncelli), dando una sensazione di suono cavernoso; questi effetti, a livelli acustici normali, sono legati a frequenze di risonanza situate nella regione 60-250 Hz. Al disotto di 60 Hz il fenomeno di risonanza sussiste ancora, ma l'orecchio non è più in grado di rilevarlo a causa della sua scarsa sensibilità (vedi curve isofoniche), tuttavia se la potenza acustica irradiata nell'ambiente raggiunge valori ragguardevoli, si ha nuovamente sensazione di suono cavernoso. Facciamo notare che valori elevati di potenza acustica sono richiesti per ottenere la giusta prospettiva sonora per le frequenze basse, prospettiva che proprio per la scarsa sensibilità dell'orecchio andrebbe perduta a potenze acustiche più contenute. Al disopra di 250 Hz, le frequenze di risonanza sono più addensate e i fenomeni ad esse connessi che assumono maggiore importanza sono quelli di interferenza e, meno, quelli di colorazione; l'interferenza influisce negativamente sulla regolarità della risposta acustica totale, soprattutto fra 300 e 1.000 Hz. Vediamo i rimedi per evitare tali inconvenienti.

In base a quanto analizzato occorre: smorzare le frequenze proprie che risultano accentuate dal complesso delle caratteristiche del locale, eliminare i fenomeni di cattiva distribuzione e propagazione dell'energia sonora dovuti agli effetti di interferenza tra diverse frequenze di risonanza tra loro vicine. Questi obbiettivi possono essere raggiunti con una scelta delle proporzioni dell'ambiente, intervenendo sulle superfici delimitanti l'ambiente e sui suoi arredi mediante materiali fonoassorbenti.

II.2. I materiali fonoassorbenti

I materiali fonoassorbenti si dividono in: *fibrosi, flessibili* e a *struttura risonante,* detti anche *risuonatori.* L'assorbimento dei materiali fibrosi è maggiore alle alte frequenze che alle basse; l'assorbimento delle frequenze acute è praticamente indipendente dallo spessore del materiale, mentre quello alle basse frequenze aumenta con lo spessore del materiale, come è illustrato in fig. II.1.

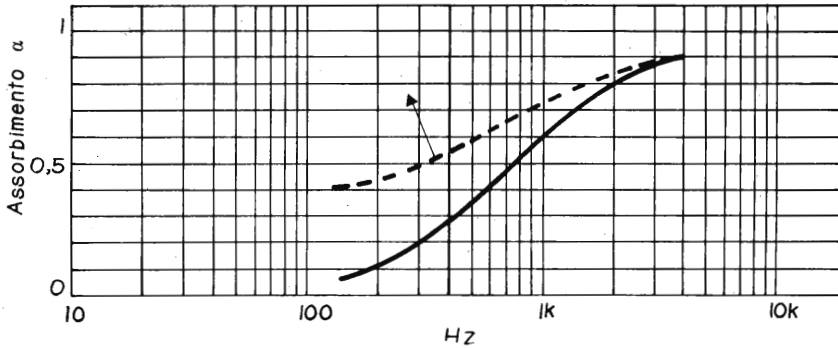


Fig. II.1 - L'assorbimento dei materiali fibrosi. Aumentando lo spessore del materiale, la curva si sposta nel senso della freccia.

Consideriamo i pannelli flessibili: se una lastra di compensato, ad esempio, è fissata ad un telaio di legno ed è posta ad una certa distanza dal muro, fig. II.2, le onde sonore che la colpiscono la mettono in vibrazione; l'onda di pressione, infatti, agisce sul pannello e lo flette, la successiva onda di depressione tende a risollevarlo, e l'elasticità di questo e dello strato d'aria racchiuso tra muro e pannello agiscono nello stesso senso: perciò il pannello raggiunge la posizione iniziale e la sorpassa, entrando cioè in vibrazione. Le due azioni si compongono e danno risonanza se hanno frequenza uguale; in tal caso l'ampiezza e la velocità del movimento del pannello aumentano ed una parte dell'energia sonora incidente si trasforma in energia meccanica di movimento ed in calore, mentre un'altra porzione è assorbita dall'attrito delle molecole d'aria retrostanti il pannello. Il valore della frequenza di risonanza è inversamente proporzionale alla massa del pannello e allo spessore della lama d'aria. L'assorbimento di un pannello flessibile è molto selettivo e si utilizza per frequenze di risonanza basse.

I risuonatori sono in genere formati da materiali contenenti delle cavità e delle aperture. Se un'onda sonora raggiunge un risuonatore, sollecita la massa d'aria contenuta in esso mettendola in movimento; in tal modo viene assorbita una parte dell'energia dell'onda sonora. Con una lastra perforata si può ottenere un insieme di risuonatori (fig. II.3). Quando essa è investita da un'onda sonora, si verificano due fenomeni che contemporaneamente causano l'effetto assorbente: l'oscillazione dell'aria nei risuonatori e le oscillazioni della lastra.

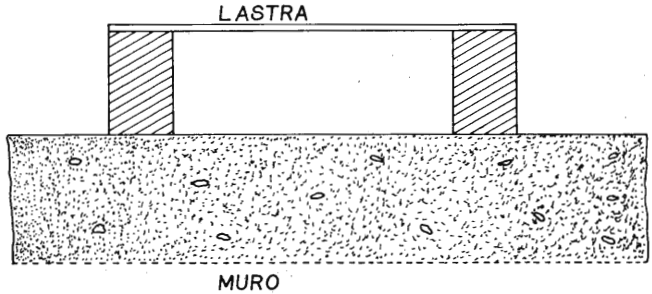


Fig. II.2 - Pannello flessibile.

Collocando del materiale poroso nel risuonatore, l'assorbimento aumenta poiché il movimento dell'aria è frenato dall'attrito sulle pareti dei pori. La parte di energia che non viene assorbita è restituita dalla bocca d'ingresso del risuonatore.

Cambiando le dimensioni delle cavità si ottengono dei risuonatori accordati su diversa frequenza.

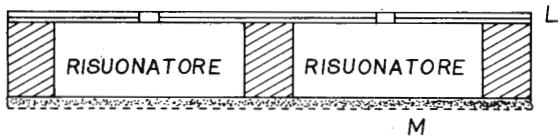


Fig. II.3 - Risuonatori ottenuti con una lastra perforata. L *è la lastra perforata,* M *è il muro.*

Se i fori hanno dimensioni differenti, l'assorbimento non è più selettivo perché i valori delle risonanze variano, e di conseguenza la curva di assorbimento varia (fig. II.4); i fori possono avere forma diversa da quella circolare. I pannelli classici assorbono frequenze comprese fra 500 e 1.250 Hz.

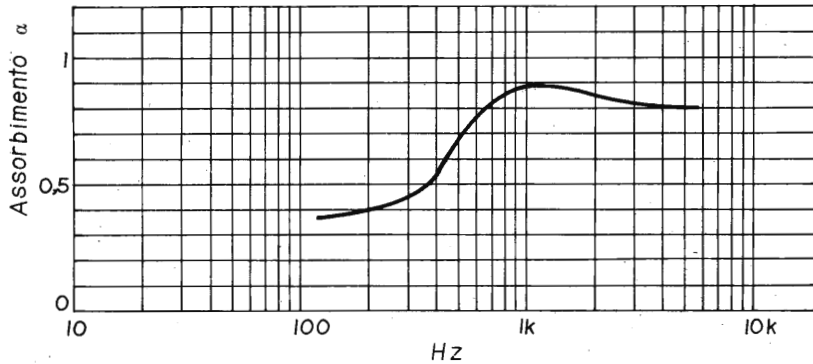


Fig. II.4 - Curva di assorbimento di pannelli per soffitti con fori di varie dimensioni e geometria.

Anche i mobili, i tappeti, i tendaggi e gli stessi ascoltatori sono elementi fonoassorbenti; a tale proposito si riporta una tabella in cui è dato il coefficiente di assorbimento alle varie frequenze per vari tipi di materiale:

Tabella II.1

Elementi assorbenti	Coefficiente di assorbimento α					
	f=125	250	500	1000	2000	4000
Parete con intonaco liscio .	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,07
Polistirolo espanso - posato sospeso	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50	0,50
Infissi in legno	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01
Velluto teso contro la parete	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,37
Vetrate ampie	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Vetrate piccole	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
Tendaggi leggeri	0,05	0,15	0,15	0,15	0,10	0,05
Legno laccato	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05
Poltrone e divani ben imbottiti	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
Superfici cromate	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
Moquette in tessuto di pelo	0,10	0,20	0,50	0,60	0,70	0,70
Mattonelle - Plastiche incollate	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02
Parquet incollato	0,04	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07
Parquet di listelli di legno .	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08	0,07
Tappeti sottili e tapezzeria in stoffa	0,03	0,04	0,11	0,15	0,20	0,20
Tappeti di lana grossa con base in feltro	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60

II.3. La correzione delle caratteristiche acustiche dell'ambiente

Descritte le caratteristiche dei materiali fonoassorbenti, vediamo come operare sulle superfici dell'ambiente.

L'uso di pannelli acustici, di differenti misure, forma e geometria, su una o più pareti, raggiunge il duplice scopo di assorbimento selettivo nella zona delle medie e basse frequenze e di una diffusione sonora operata dagli spigoli e dai bordi dei pannelli stessi. La realizzazione di diffusione dell'energia sonora in modo che essa sia sostanzialmente la stessa nei vari punti del locale è ottenibile mediante pareti con caratteristiche diffondenti, ottenute mediante forme irregolari sia dal punto di vista geometrico (rilievi) che da quello acustico, e con la distribuzione irregolare di materiali assorbenti; quest'ultima riduce la propagazione delle onde in direzione parallela alle dimensioni *X, Y, Z* (propagazione questa che contribuisce alla formazione di onde stazionarie), favorendo la diffusione dell'energia sonora; l'irregolarità geometrica delle pareti e l'introduzione di arredamenti con volume di qualche decina di cm^3 contribuisce ad una corretta diffusione dell'energia sonora soprattutto per le frequenze medie ed acute. Nella riproduzione sonora la dislocazione dei diffusori acustici può avere notevole influenza nella omogeneizzazione del campo sonoro e più in generale sulla loro resa. Anche l'aumento del numero delle sorgenti sonore realizza l'omogeneizzazione del campo sonoro; nella stereofonia l'aggiunta di un canale centrale rispetto a quelli laterali amplia il fronte sonoro e ne migliora il campo, purché il bilanciamento del terzo canale venga effettuato con cura.

Infine, vogliamo far notare che non si deve confondere l'isolamento acustico con la correzione acustica: il primo si riferisce alla energia trasmessa ai locali adiacenti, mentre la correzione riguarda solo il vano in cui si trova la sorgente sonora. I due principi ricorrono a tecniche completamente differenti; la quantità di energia trasmessa da una parete è praticamente indipendente dalle caratteristiche più o meno assorbenti del suo rivestimento. La natura della parete posta tra due locali è uno solo dei fattori che intervengono nel loro isolamento. Per definire la qualità acustica di una parete, si deve utilizzare la nozione di indice di assorbimento acustico ed evitare di parlare di isolamento. Fissate le dimensioni dell'ambiente d'ascolto, avendone analizzato le caratteristiche acustiche, l'eventuale correzione acustica da eseguire serve a realizzare la durata ottimale del tempo di riverberazione che, nel caso di riproduzione di suoni mediante altoparlanti, in piccoli ambienti non deve superare mediamente, nella banda delle medie frequenze, 0,5 s.

CAPITOLO TERZO

LA RICERCA PSICOACUSTICA

Si è accennato alle caratteristiche fisiche del suono mediante il concetto di onde sonore e si è visto come queste si comportano in un ambiente d'ascolto; per permettere al lettore di fare una corrispondenza fra le caratteristiche fisiche e la realtà sonora si è accennato alle sensazioni acustiche. In questo capitolo si parlerà del processo sonoro inteso come problema di sensazione.

La ricerca psicoacustica sperimentale, con suoni puri, porta a delle conclusioni che permettono di veder meglio i limiti delle cognizioni acquisite; ma appena si tenta di ripetere le ricerche affrontando la realtà pratica, ad esempio dei suoni musicali, ci si trova di fronte a problemi insolubili con i mezzi attuali.

In questo capitolo si descriveranno le ricerche effettuate in laboratorio con suoni sinusoidali continui, e si prenderanno in considerazione esperienze nella realtà pratica.

III.1. Il livello d'intensità della sensazione auditiva

Il livello d'intensità della sensazione auditiva con suoni sinusoidali continui, diretti e non diffusi, viene espresso in modo significativo dalle curve di Fletcher-Munson, dette *curve isofoniche,* cioè di uguale sensazione d'intensità (fig. III.1).

In una camera anecoica, scelta come campione del livello di intensità auditiva la sensazione ottenuta con la frequenza di 1.000 Hz, ad un dato livello di pressione sonora (dato oggettivo), il livello d'intensità auditiva di un altro suono viene determinato per confronto con il campione, confronto auditivo eseguito da un certo numero di persone di ogni estrazione sociale ed età ed elaborato statisticamente; il valore ottenuto dall'elaborazione viene espresso in *Phon.* Tutte le frequenze che danno la stessa sensazione d'intensità hanno lo stesso valore in *Phon*; tale valore, per la frequenza di 1.000 Hz, coincide con il livello di pressione sonora misurata in dB; così ad esempio, un suono la cui intensità viene giudicata uguale a quello di

1.000 Hz con livello di pressione sonora di 40 dB, ha un valore d'intensità di 40 Phon. Il numero posto su ciascuna curva del diagramma esprime infatti, con progressione di dieci in dieci Phon, l'andamento del livello della pressione relativa alla isofonia di tutte le frequenze udibili, mentre il valore posto in ordinate esprime il livello di pressione sonora espresso in dB.

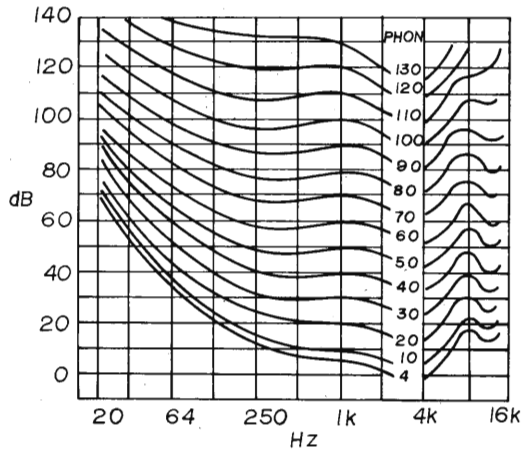


Fig. III.1 - Curve isofoniche.

L'apprezzamento del volume sonoro in funzione dell'incremento in Phon di uno stesso suono viene espresso dalla scala dei *Son,* 1 Son corrisponde a 40 Phon, alla soglia del dolore (140 Phon) corrispondono 1 024 Son. La relazione che lega il valore in Phon con il valore in Son è

$$S = 2^{\frac{L-40}{10}}$$

con L espresso in Phon.

La relazione è espressa graficamente dal diagramma di fig. III.2 dove in ordinate è riportato il valore in Son e in ascissa il valore in Phon.

Per eseguire misure della sensazione d'intensità dei suoni diffusi occorre: che questi siano uniformi in tutte le direzioni, che la

sorgente emetta suoni con frequenze modulate o rumori a stretta banda, che venga fatto il confronto auditivo fra il suono diffuso e quello di un suono sinusoidale continuo e diretto a 1.000 Hz che

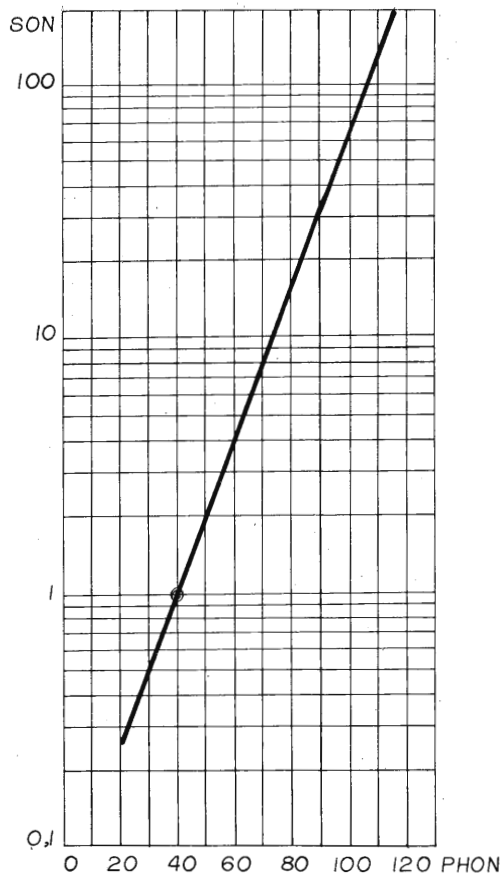


Fig. III.2 - Relazione fra Son e Phon.

dia la stessa sensazione d'intensità, che si calcoli la differenza fra la pressione sonora del suono diffuso e quella del suono a 1.000 Hz. I risultati vengono riportati su un grafico; in fig. III.3 è riportato come esempio il diagramma di una curva isofonica per suoni diffusi.

Per la determinazione della curva del livello d'intensità acustica

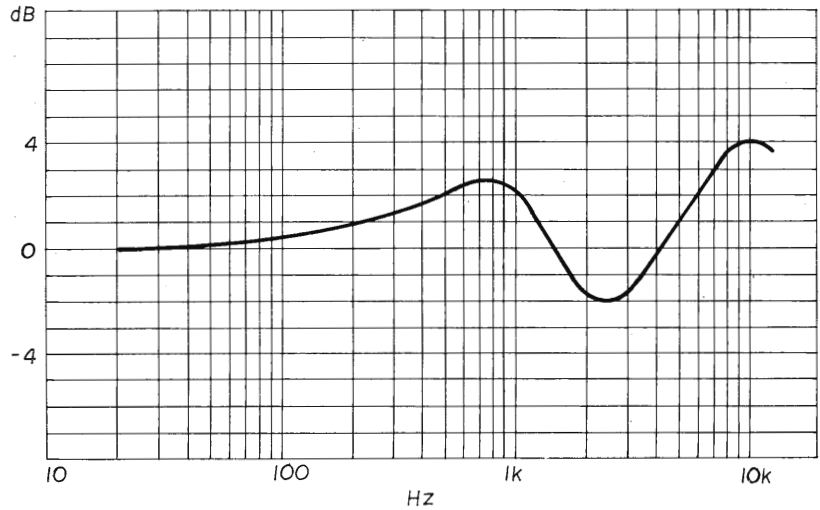


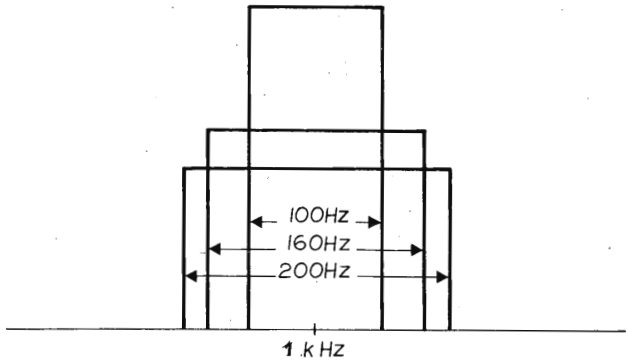
Fig. III.3 - Curva isofonica per suoni diffusi.

prodotta da un suono composto da una banda di frequenze (suoni a larga banda), ci serviamo della fig. III.4 a che illustra una serie di suoni con spettro la cui larghezza di banda è rispettivamente: 100 Hz; 160 Hz; 200 Hz ed aventi come centro la frequenza di 1.000 Hz.

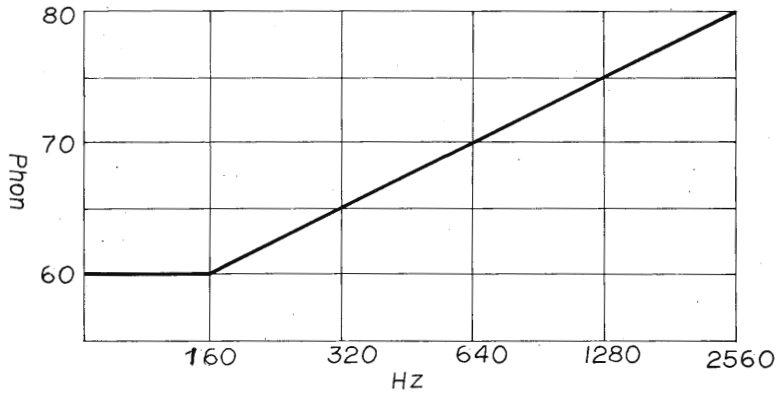
L'area di ogni rettangolo esprime l'intensità sonora del suono corrispondente; i tre rettangoli hanno medesima area, ma la percezione d'intensità è differente. La fig. III.4 b mostra la variazione di tale percezione; per una larghezza di banda fino a 160 Hz il livello d'intensità è costante, al di là di questo valore la percezione d'intensità cresce in modo uniforme. La larghezza di banda avente valore 160 Hz, fino a cui corrisponde il valore costante d'intensità auditiva, è detta *banda critica* per la frequenza centrale di 1.000 Hz. Se si cambia frequenza centrale e si passa, ad esempio, alla frequenza di 450 Hz, la larghezza di banda critica assume il valore di 110 Hz; così tutto lo spettro sonoro viene diviso in 24 bande critiche a cui corrispondono altrettante frequenze centrali, come riportato in tabella III.1.

La minima larghezza di banda critica la troviamo fra 1.370 e 2.500 Hz, stessa fascia di frequenze dove si riscontra il massimo della sensibilità auditiva (vedi curve isofoniche); precisiamo che il

minimo della larghezza di banda è inteso come valore relativo alla frequenza centrale.



a



b

Fig. III.4 - Percezione di suoni aventi spettro differente:

a) *esempi di suoni aventi spettro di differente larghezza ma identica intensità;*

b) *la percezione dell'intensità, in Phon, in funzione della larghezza di banda, a parità di intensità sonora.*

Tabella III.1

N. di banda critica	Frequenza centrale	Largh. di banda (valore assoluto)	Largh. di banda (valore relativo alla frequenza centrale)
1	50	100	2
2	150	100	0,67
3	250	100	0,40
4	350	100	0,29
5	450	110	0,24
6	570	120	0,21
7	700	140	0,20
8	840	150	0,18
9	1.000	160	0,16
10	1.170	190	0,16
11	1.370	210	0,15
12	1.600	240	0,15
13	1.850	280	0,15
14	2.150	320	0,15
15	2.500	380	0,15
16	2.900	450	0,16
17	3.400	550	0,16
18	4.000	700	0,18
19	4.800	900	0,19
20	5.800	1.100	0,19
21	7.000	1.300	0,19
22	8.500	1.800	0,21
23	10.500	2.500	0,24
24	13.500	3.500	0,26

III.2. Valutazione della sensazione dell'altezza e il volume sonoro

Generalmente intendiamo per *altezza sonora soggettiva* l'ordinamento di suoni in una qualsiasi graduatoria dal basso all'alto; i musicisti ordinano i suoni in intervalli, detti *ottave melodiche*, mediante la scala musicale costituita da una serie di note corrispondenti a suoni di frequenza progressiva; gli intervalli musicali comprendono consecutivamente otto note delle quali l'ottava corrisponde a un suono di altezza soggettiva doppia rispetto alla prima (le note della scala si ripetono analogamente nelle varie ottave). In fisica invece, si chiama ottava l'intervallo fra due frequenze che stanno in rapporto 2/1.

Nella valutazione soggettiva, non sempre al raddoppio della frequenza corrisponde il raddoppio della sensazione di altezza, come

illustrato nel diagramma di Stevens ottenuto con prove sperimentali (fig. III.5).

L'unità di misura della valutazione soggettiva dell'altezza è il *Mel*; questa è stata fissata con il seguente procedimento di tipo statistico. A persone non abituate a riconoscere i suoni, si fanno ascoltare, mediante oscillatori elettronici, due suoni, uno di frequenza molto bassa e uno di 4.000 Hz, poi si chiede di manovrare l'oscillatore sino a quando ritengono di udire un suono che cada a metà fra

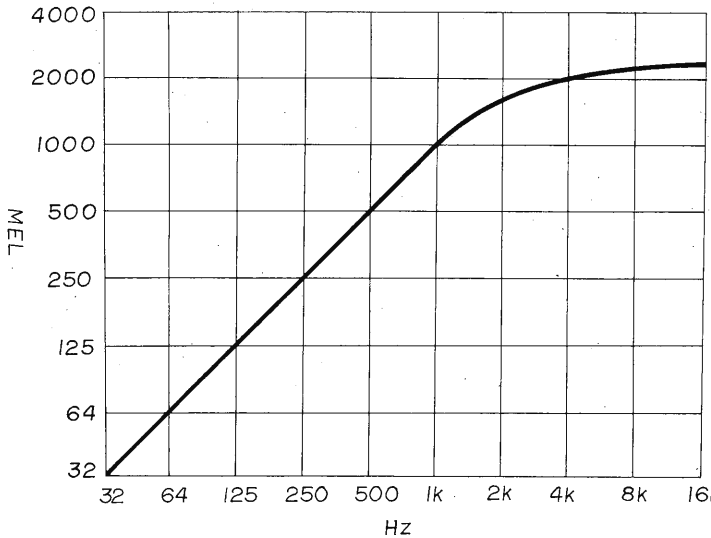


Fig. III.5 - Diagramma di Stevens.

la frequenza bassa e i 4.000 Hz; statisticamente la scelta cadrà intorno a 1.000 Hz anziché 2.000 Hz. Per la valutazione soggettiva dell'altezza, la frequenza di 1.000 Hz a 60 dB è la frequenza centrale fra 16 Hz e 4.000 Hz; a 1.000 Hz corrispondono 1.000 Mel, fra 16 e 16.000 Hz si ha un intervallo compreso fra 16 e 2.400 Mel.

Volendo valutare in Mel l'altezza soggettiva delle bande critiche, si ottiene un valore approssimato di 100 Mel per ogni banda critica. Un'altra misura, usata per valutare l'altezza soggettiva, è il *Bark:* 1 Bark = 100 Mel. La gamma di frequenze audio, suddivisa in bande critiche, è ricoperta da 24 Bark; la fig. III.6 mostra come la valutazione dell'altezza, in Bark, è legata alla frequenza centrale delle bande critiche.

Quando coesistono più suoni contemporaneamente, ogni suono esercita sull'altro un effetto sul volume sonoro, detto *effetto di mascheramento,* che può essere parziale o totale dipendentemente dalle loro reciproche posizioni rispetto alle bande critiche; l'effetto è più accentuato per i suoni gravi su quelli alti. Se prendiamo due suoni, uno appartenente alla seconda banda critica e avente un volume sonoro di 13 Son, l'altro appartenente alla dodicesima banda

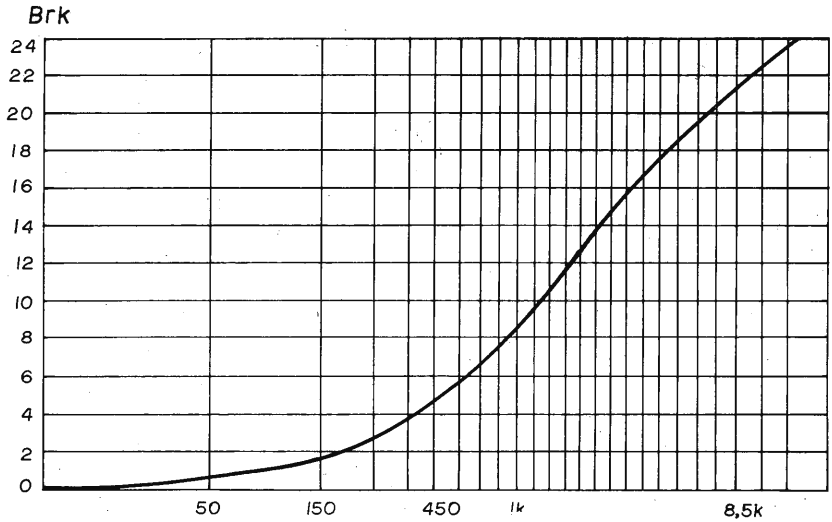


Fig. III.6 - La valutazione dell'altezza di un suono in Bark.

e avente anch'esso un volume di 13 Son, il volume complessivo dovuto ai due suoni simultanei sarà valutato a 26 Son. Prendiamo altri due suoni aventi rispettivamente 13 Son come volume sonoro ma appartenenti rispettivamente alla settima e nona banda critica; in questo caso la percezione del volume sonoro dei due suoni emessi simultaneamente sarà valutato a 19 Son. Infine, ripetiamo l'esperimento con altri due suoni aventi rispettivamente ancora 13 Son come volume sonoro ma appartenenti alla medesima banda critica, ad esempio l'ottava; in questo caso la percezione del volume sarà valutata ad appena 16 Son. Nel primo caso, in cui la distanza fra le bande critiche è di 10 Bark, non abbiamo effetto di mascheramento; nel secondo caso, in cui la distanza fra le bande critiche è di 2 Bark, si ha effetto di mascheramento parziale; nel terzo caso, in cui la distanza è minore di 1 Bark, si ha effetto di mascheramento totale.

Vogliamo far presente che l'esempio riportato è solo indicativo e i valori dell'ampiezza della distanza fra bande critiche non può essere fissato in termini costanti, poiché l'effetto di mascheramento dipende dal valore delle frequenze dei suoni considerati e dalla banda critica in cui essi cadono.

Riassumendo: se le frequenze sono ravvicinate, esse, per l'orecchio, si influenzano; il volume sonoro totale non sarà più la somma dei due volumi sonori parziali, ma sarà inferiore.

Non bisogna confondere l'effetto di mascheramento con quello dell'ascolto intenzionale. Il mascheramento è un fenomeno indipendente dalla nostra volontà; l'ascolto intenzionale, invece, è un fatto d'attenzione e quindi di educazione. Un direttore d'orchestra riesce ad isolare in una tessitura strumentale molto complessa il particolare che lo interessa, mentre per la maggior parte degli ascoltatori quel particolare resta mescolato nella sonorità generale; in analisi di laboratorio, come quelle precedentemente illustrate, anche il direttore d'orchestra si comporta come un ascoltatore qualsiasi.

Una variazione dell'intensità del suono può far percepire quello stesso suono più o meno alto: due suoni sinusoidali continui, di eguale frequenza ma di differente livello di pressione sonora, possono determinare una diversa sensazione d'altezza. Per mantenere costante la sensazione dell'altezza di un suono sinusoidale continuo, al crescere della sua intensità, bisogna alterare la sua frequenza in più o in meno a seconda dei casi; ad esempio, ad un suono di 288 Hz a 80 dB corrisponde la stessa sensazione di altezza soggettiva di quella ottenuta con un suono di 300 Hz a 20 dB; a un suono di 490 Hz a 90 dB corrispondono 500 Hz a 40 dB; a 990 Hz a 100 dB, corrispondono 1.000 Hz a 80 dB; a 4.000 Hz a 95 dB corrispondono 3.840 Hz a 40 dB; a 8.000 Hz a 70 dB corrispondono 7.600 Hz a 60 dB.

Per concludere l'argomento sul volume e l'altezza sonora, diciamo che in pratica per i suoni complessi come per un pieno di orchestra, il contributo all'intensità totale è dovuto essenzialmente alle frequenze comprese fra 50 e 4.000 Hz, con una particolare rilevanza per la banda compresa fra 100 e 2.000 Hz, alla quale si deve l'apporto di circa l'80 %.

III.3. Il timbro

Nel precedente capitolo abbiamo detto che l'altezza e il timbro sono legati alla frequenza, senza fare ulteriori precisazioni, ciò a causa dell'impossibilità di distinguere con i mezzi attuali il limite che separa queste due percezioni. In questo paragrafo si parlerà della

sensazione del timbro nella pratica musicale, dove non si ascoltano suoni puri e continui, ma suoni complessi e di breve durata con fluttuazioni di altezza, di intensità e di timbro, le quali rendono variabili istante per istante tutti i parametri fisici del suono; in una tale situazione, con le attuali conoscenze, non rimane altro che eseguire prove empiriche e registrarne i risultati.

Per il timbro, si può dire che esso è quella qualità che ci consente di distinguere il suono dei vari strumenti e in generale delle varie sorgenti sonore. Le cause fisiche delle sensazioni del timbro sono: lo spettro del suono che provoca la sensazione, il comportamento nel tempo delle componenti stesse dello spettro, il transitorio d'attacco e quello d'estinzione dell'evento sonoro; mentre, per quanto concerne la sensazione dell'ascoltatore nel percepire le cause fisiche del timbro, essa dipende dal tempo impiegato ad integrare tale percezione.

Abbiamo già detto cosa intendere per spettro sonoro; consideriamo ora l'inviluppo dello spettro stesso, espresso dalla linea che congiunge le estremità delle varie componenti, come illustrato in fig. III.7; ai massimi di questo inviluppo corrispondono delle frequenze caratterizzanti la sorgente sonora; tali frequenze sono dovute a fenomeni di risonanza della sorgente stessa.

Ogni sorgente sonora risponde in modo proprio alle sollecitazioni acustiche, risuonando preferenzialmente su certe frequenze piuttosto che su certe altre, senza che però venga meno il carattere tipico del suono della sorgente; ad esempio, due pianoforti, uno a coda e uno verticale, che emettono la stessa nota con la stessa intensità, della stessa durata, conserveranno sempre le caratteristiche sonore generali di quella nota, ma si distingueranno fra loro per quelle sfumature timbriche che dipendono dalle risonanze proprie di ogni singolo strumento. Le varietà timbriche, legate ai possibili modi di risonanza della sorgente, dipendono dal modo in cui le frequenze di risonanza vengono eccitate, dalla durata dell'eccitazione, dalla modalità di estinzione e dal tempo di estinzione.

Così, riprendendo come esempio il pianoforte, quando il martelletto viene a contatto della corda, il feltro che lo ricopre si comprime, la corda comincia a vibrare, il feltro si espande ed il martelletto torna nella posizione di riposo; dalla durata del contatto del martelletto con la corda dipende la sonorità dello strumento; la corda eccitata impiega un tempo transitorio (millisecondi) per entrare in regime di vibrazione e, appena raggiunta la massima ampiezza, inizia il transitorio di estinzione che può avere una durata di alcuni secondi.

Per completare l'analisi della sensazione del timbro, consideriamo i transitori di risposta dell'orecchio umano alle sollecitazioni

acustiche. Questi transitori, di natura fisiologica soggettiva, dipendono, come causa esterna, dai transitori della sorgente sonora e dalle successive variazioni del suono. Per le frequenze sinusoidali comprese fra 500 e 2.500 Hz a una intensità di 60 dB, sono necessari non meno di 50 ms affinché il suono possa essere percepito nella sua interezza, mentre per le frequenze basse questo tempo raggiunge valori compresi fra 150 e 300 ms. Per i suoni complessi, questi tempi diminuiscono, ad esempio per il suono della tromba, per le note medio alte, si ha un tempo di 20-25 ms, mentre per i suoni gravi si ha un tempo di 80-100 ms

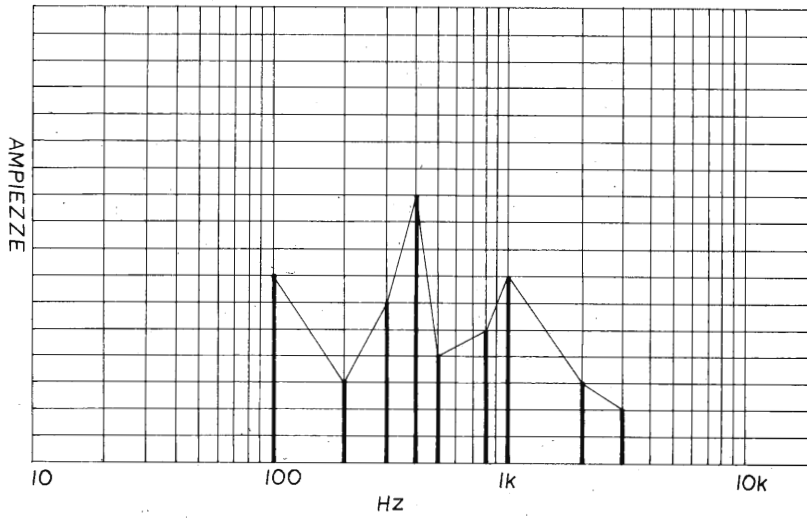


Fig. III.7 - Spettro di una sorgente sonora.

Le stesse cause fisiologiche, per le quali è necessario un tempo transitorio per la percezione completa del timbro, concorrono alla esistenza di un transitorio di estinzione dell'immagine sonora la cui durata è valutata in 0,1 s. Si può dunque dire che, per le frequenze rispetto alle quali l'orecchio risponde col massimo della sua sensibilità, la durata minima di un suono che sia percepito in modo integrale si aggira attorno ai 150 ms, di cui 50 ms del transitorio d'attacco e 100 ms del transitorio d'estinzione. Ciò non vuol dire che non si possono percepire sequenze di suono molto più rapide: tali suoni vengono ugualmente uditi, ma non in modo integrale.

III.4. Lo spazio sonoro: stereofonia e quadrafonia

L'effetto stereofonico consiste nella facoltà di riconoscere la provenienza e la localizzazione dei suoni. Mentre rimane ben preciso il riconoscimento della direzione di provenienza del suono, il riconoscere la localizzazione è un fatto soggettivo, poiché occorre associare la distanza della sorgente, l'intensità del suono, le caratteristiche riverberanti dell'ambiente; organizzando adeguatamente queste condizioni, si possono apprezzare effetti di posizione spaziale in profondità ascoltando sorgenti sonore monofoniche, mentre, con le stesse, non si ha alcun effetto di direzione di provenienza.

Anche qui non tutte le cause del fenomeno sono state accertate; l'unica di cui si è certi riguarda la differenziazione con cui i suoni vengono ricevuti dalle orecchie quando provengono da direzioni diverse; infatti, quando la sorgente sonora è situata perpendicolarmente all'asse ideale che passa fra le due orecchie dell'ascoltatore, questi riceve il suono in modo simmetrico, avvertendolo in posizione centralizzata; se invece le onde sonore provengono da un'altra direzione, arrivano alle due orecchie in modo differenziato. Per avvertire la differenza di direzione occorre che la sorgente sonora si sposti di almeno sei gradi in senso orizzontale e di otto gradi in senso verticale. Consideriamo gli effetti stereofonici analizzando l'ascolto di una grande orchestra; in fig. III.8 è illustrato come è disposta una grande orchestra sinfonica; varie situazioni analoghe hanno rilevato che l'angolo massimo da cui vengono i suoni diretti non supera i sessanta gradi; quindi, dato l'angolo minimo di direzionalità orizzontale, si possono rilevare dieci direzioni sufficientemente separate, che sono molte riguardo la prima linea frontale ma diventano poche se si valuta la profondità.

La riproduzione stereofonica realizzata con mezzi elettroacustici permette: la percezione degli effetti direttivi, una maggiore selettività delle fonti sonore, l'illusione di uno spazio sonoro che simula soddisfacentemente la realtà. Parliamo di illusione, perché un elemento non materiale, ma essenziale, della riproduzione stereofonica è la componente psicologica dell'ascoltatore che ricrea in se stesso inconsciamente quella dimensione spaziale che in realtà non esiste mancando una prospettiva sonora concreta, in quanto gli effetti sonori sono portati da un fronte d'onda che va solo da un altoparlante all'altro, mancando dietro di questo altre sorgenti sonore che nella esecuzione originale dell'evento sonoro erano presenti.

Nemici della riproduzione stereofonica sono sia la disposizione degli altoparlanti che l'acustica del locale; queste, se non ben approntate, fanno perdere parte del panorama sonoro. Una nuova tec-

nica di riproduzione sonora, ancora in fase di sviluppo, supera di fatto le limitazioni acustiche del locale d'ascolto; questa tecnica prende il nome di *quadrafonia.*

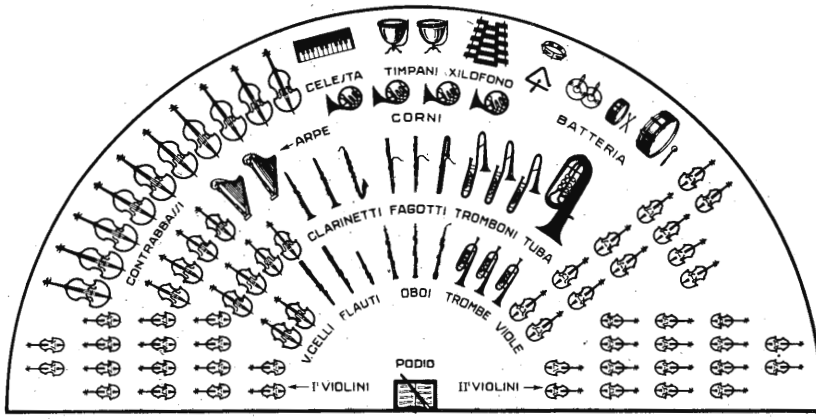


Fig. III.8 - Disposizione di una grande orchestra.

Con questa tecnica s'introducono nuovi criteri riguardanti la riproduzione spaziale del fronte sonoro, criteri ottenuti con particolari tecniche di ripresa sonora e di riproduzione. L'ascoltatore della stereofonia assiste all'evento sonoro da una posizione frontale; nella quadrafonia egli si trova invece immerso in un campo sonoro dovuto all'effetto congiunto di quattro altoparlanti i quali diffondono segnali opportunamente correlati che invadono omogeneamente quasi tutto l'ambiente. L'ampliamento della zona omogenea d'ascolto riduce a valori inapprezzabili gli inconvenienti che insorgono dalle caratteristiche acustiche dei normali ambienti d'ascolto, rendendo un'immagine suggestiva del panorama sonoro.

CAPITOLO QUARTO

LA REGISTRAZIONE E LA RIPRODUZIONE DEL SUONO. IL DISCO

Si deve ad Edison (1878) l'invenzione del primo apparecchio, il fonografo, che consentì la registrazione e la riproduzione del suono; il supporto utilizzato era un cilindretto sul quale erano incise le vibrazioni sonore. Nel 1887 E. Berliner brevettò il grammofono che presentava una novità sostanziale: il cilindro era sostituito da un disco, il che consentiva la possibilità di riprodurre la registrazione con facilità in un numero grande di copie mediante operazioni di stampa. Il solco era inciso con profondità costante e si presentavà ondulato lateralmente, in quanto lo stilo si muoveva parallelamente al piano del disco e perpendicolarmente al solco stesso. In quegli anni incominciò quindi lo sviluppo dell'industria discografica, che ebbe una costante evoluzione sotto ogni aspetto, dal materiale impiegato per i dischi ai meccanismi di trascinamento e ai trasduttori: si passò infatti dalla rotazione a mano ai motori a molla e infine ai motori elettrici; dai diaframmi vibranti ai fonorivelatori; dalle trombe acustiche agli amplificatori e altoparlanti.

IV.1. La registrazione e la riproduzione del suono. Generalità

Vediamo di rappresentare, con schemi a blocchi, e in linea di principio, le operazioni che intervengono nella registrazione e riproduzione meccanica del suono.

1) *Registrazione del suono.*

Come si vede in fig. IV.1, il segnale sonoro che vogliamo registrare viene raccolto dai trasduttori 1, cioè da microfoni, che lo trasformano in segnale elettrico; questo viene amplificato da un preamplificatore 2 e successivamente, dopo essere stato miscelato, trattato con un equalizzatore 3 che corregge la curva di risposta, adattandola alle caratteristiche del sistema usato per la registrazione. Il blocco successivo, amplificatore di potenza 4, consente di aumentare il livello di potenza del segnale elettrico, che è ora in grado di coman-

dare il trasduttore elettro-meccanico, cioè il fonoincisore 5; questo trasforma il segnale elettrico in vibrazione meccanica che viene registrata sul disco 6.

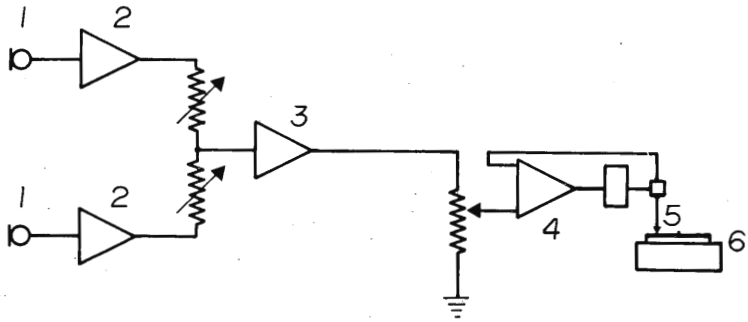


Fig. IV.1 - La registrazione del suono.

2) *Riproduzione del suono.*

In fig. IV.2 il primo blocco è il fonorivelatore 1, il cui scopo è di trasformare le vibrazioni dello stilo in segnale elettrico, che viene poi amplificato da un amplificatore di tensione 2, munito di equalizzatori che compensano le alterazioni dovute alla registrazione e adattano la curva di risposta alla situazione ambientale di ascolto. Il segnale elettrico così trattato viene amplificato mediante un amplificatore di potenza 3 e infine applicato ai trasduttori elettro-acustici (altoparlanti) 4, che trasformano il segnale elettrico in segnale acustico.

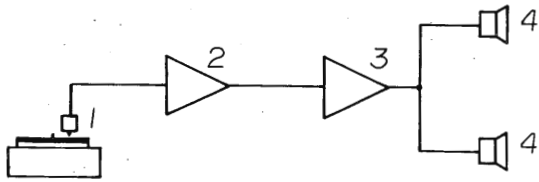


Fig. IV.2 - La riproduzione del suono.

Premesse queste considerazioni generali sulla registrazione e riproduzione del suono, nei capitoli successivi si prenderanno in considerazione i vari blocchi e i componenti di ogni blocco del sistema di riproduzione, per esaminare i principi di funzionamento e le caratteristiche tecniche fondamentali.

Tutti i componenti di una catena di riproduzione sonora, perché possano essere considerati componenti costituenti una catena Hi-Fi, debbono possedere determinati requisiti. Purtroppo non è stato ancora raggiunto un accordo a livello internazionale o anche solo europeo in modo da stabilire un'unica normativa. Attualmente vi sono diverse organizzazioni, che operano nel campo della riproduzione sonora, che stabiliscono, o per nazione, o per categoria di fabbricanti di componenti audio, le norme perché un componente sia considerato Hi-Fi; fra queste organizzazioni citiamo:

la Deutscher Industrie Normenausschuss (DIN) della Germania Occ.;
l'Institute of High Fidelity inc. (IHF) negli Stati Uniti;
la British Standards Institution (BSI) in Gran Bretagna;
l'International Electrotechnical Commission (IEC), una Commissione internazionale con sede a Ginevra.

Le organizzazioni BSI, IHF, IEC operano essenzialmente sulle norme riguardanti i metodi di misura; mentre, al momento, solo le norme DIN stabiliscono sia i criteri per i metodi di misura che i requisiti minimi che debbono possedere i componenti Hi-Fi.

L'analisi dei componenti la catena Hi-Fi verrà descritta con riferimento prevalente ai dati delle norme DIN.

IV.2. L'incisione del solco nel disco monofonico

Si è visto che l'uso del disco come supporto della registrazione ha consentito lo sviluppo della tecnica del suono, grazie alla facilità di fabbricazione del disco stesso in un numero grande di copie. La informazione (musica, voce) viene incisa sotto forma di solco (pista) mediante un dispositivo, il cosiddetto trasduttore elettromeccanico, che trasforma il segnale elettrico in vibrazione meccanica che viene registrata sul disco.

L'incisione può essere fatta in due modi:

1) *Incisione verticale o in profondità.*

In questo tipo di incisione il bulino, o punta incidente, si muove in direzione perpendicolare al piano del disco, cioè verticalmente; a seconda dell'intensità del segnale che si vuole registrare, incide perciò più o meno profondamente il disco. In figura IV.3 a è riportato il solco di un disco inciso verticalmente: si ha una visione della pista, con una schematizzazione del bulino; le frecce indicano le possibilità di movimento del bulino.

2) *Incisione orizzontale o laterale.*

In questo tipo di incisione il bulino incide con profondità costante, ma ha la possibilità di muoversi lateralmente, perpendicolarmente al solco non modulato, in misura più o meno grande a seconda del segnale da registrare. La figura IV.3 b dà un'idea di come avvenga l'incisione; si noti che la profondità di penetrazione è costante.

L'incisione orizzontale o laterale garantisce minori distorsioni e perciò ha sostituito l'incisione verticale.

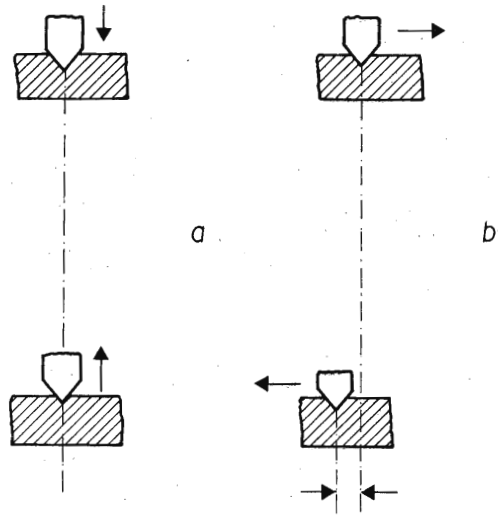


Fig. IV.3 - a) *incisione verticale o in profondità del disco;* b) *incisione laterale o orizzontale.*

IV.3. L'incisione stereofonica

Finora si è parlato del disco monofonico. Nel caso del disco stereo, il problema consiste nel fare in modo che la pista porti le due informazioni relative rispettivamente al canale destro e al canale sinistro. Si utilizza un bulino incisore dotato di due possibilità di movimento, in direzioni inclinate simmetricamente di 45° rispetto alla perpendicolare al piano del disco. In figura IV.4 è schematizzata la puntina per l'incisione. I segnali elettrici relativi ai due canali sono applicati rispettivamente alla bobina 1 e alla bobina 2; queste determinano il movimento del bulino rispettivamente nelle direzioni *a-a* e *b-b*; la punta incide così più o meno profondamente il lato destro

e il lato sinistro del solco, a seconda delle informazioni provenienti rispettivamente dal canale 1 e dal canale 2.

Le figure successive rappresentano alcuni casi possibili di incisione. In figura IV.5 a è rappresentato il caso in cui è presente un

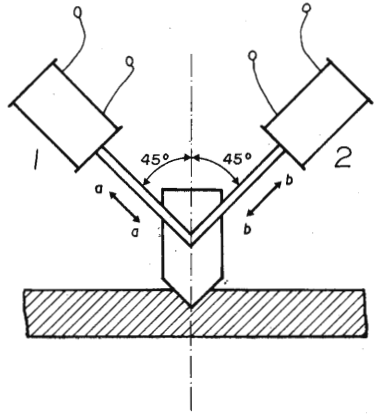


Fig. IV.4 - Incisione stereofonica: bulino incisore.

solo canale; il bulino si muove solo nella direzione segnata e quindi è inciso solo il fianco destro del solco. La figura IV.5 b rappresenta il caso in cui è presente solo il secondo canale e quindi viene inciso solo il fianco sinistro del solco. Infine in figura IV.5 c si ha il caso generale, con solco inciso su entrambi i lati.

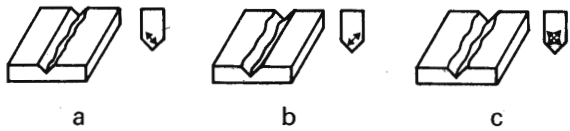


Fig. IV.5 - Incisione stereofonica:
a) *incisione del fianco destro del solco;* b) *incisione del fianco sinistro del solco;* c) *incisione su entrambi i fianchi.*

Si è descritto il tipo di incisione detto 45-45; questo non è però l'unico tipo possibile. Infatti se per stereofonia si intende la presenza nel solco di due informazioni, essa può essere realizzata anche combinando l'incisione verticale e l'incisione orizzontale; si ottiene così un

solco la cui profondità è in relazione con l'informazione di un canale e il cui scostamento laterale dal solco non modulato è in funzione dell'informazione dell'altro canale. Si è però preferito adottare l'incisione 45-45, in quanto presenta due vantaggi. In primo luogo è una registrazione simmetrica, cioè le informazioni dei due canali sono trattate nello stesso modo e quindi diminuisce la possibilità di distorsione. In secondo luogo si riesce a realizzare la compatibilità tra disco stereofonico e disco monofonico, cioè entrambi i dischi possono essere letti sia da un rivelatore monofonico sia da un rivelatore stereofonico. Per questo la fase relativa dei canali stereo è stata standardizzata in modo che due segnali di uguale ampiezza e in fase diano uno scostamento laterale; la lettura monofonica combina le componenti orizzontali di entrambi i canali.

IV.4. Correzione dell'incisione

Per mantenere l'ampiezza dell'incisione costante, si rende necessaria una correzione. Infatti, senza correzione, i fonoincisori funzionano in modo che il bulino ha velocità di taglio costante, cioè indipendente dalla frequenza del segnale che si vuole registrare; la sua velocità è in funzione solo dell'ampiezza del segnale. Ne deriva che, senza correzioni, a parità di ampiezza del segnale elettrico, lo spostamento del bulino dalla posizione di riposo è tanto maggiore quanto più bassa è la frequenza del segnale; viceversa, quanto più alta è la frequenza tanto minore è l'ampiezza della registrazione. Ciò comporta evidentemente inconvenienti sia alle basse sia alle alte frequenze. Alle frequenze basse si hanno incisioni di eccessiva ampiezza e questo rende necessaria una spaziatura notevole tra solco e solco, con conseguente riduzione del numero dei solchi e quindi della durata della registrazione, a parità di dimensioni del disco; diversamente avremmo il rischio dell'accavallarsi di solchi contigui. Inoltre, sempre alle frequenze basse, l'eccessiva ampiezza dell'incisione può comportare delle difficoltà di lettura o comunque l'apparire di distorsioni. Per quanto riguarda il comportamento alle alte frequenze, si ha l'inconveniente opposto: l'ampiezza dell'incisione è cioè così piccola che il segnale stesso può non essere più rivelabile in fase di lettura, sommerso dal rumore di fondo.

Per evitare questi inconvenienti, si usano dei circuiti correttori; un esempio è dato in figura IV.6: la curva è della RIAA (Record Industry Association of America). Si vede che la velocità di oscillazione impressa al bulino aumenta con la frequenza; si riesce in questo modo ad ottenere una incisione ad ampiezza pressoché costante.

Naturalmente occorrerà tenere presente, in fase di rivelazione, il diverso trattamento che hanno subito le varie frequenze, in modo da compensarlo ed ottenere una riproduzione acustica il più possibile fedele all'originale.

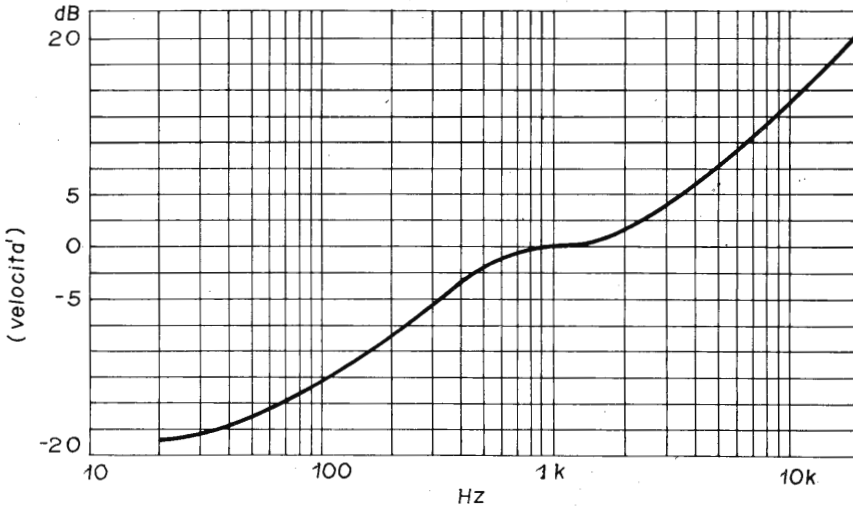


Fig. IV.6 - Curva RIAA.

IV.5. La quadrafonia

La quadrafonia consiste in un sistema stereo, in cui i canali sono quattro anziché due; in questo modo l'ascoltatore, trovandosi circondato da quattro altoparlanti, ha la sensazione di essere al centro di un grande ambiente. Infatti, in una sala da concerto, all'orecchio dell'ascoltatore giungono non solo i suoni provenienti direttamente dall'orchestra, ma anche le onde sonore riflesse dalle pareti, dal soffitto e dalla parte posteriore dell'auditorium. È questo complesso di informazioni sonore ricevute da ogni parte, elaborate dal cervello, che dà all'ascoltatore la sensazione di trovarsi in una grande sala, anche indipendentemente dal fatto visivo.

Durante la riproduzione sonora, l'ascoltatore è posto fra quattro altoparlanti (vedi figura IV.7), ognuno dei quali è alimentato dal segnale sonoro corrispondente a un determinato canale. Si capisce come, pur essendo l'ascoltatore a casa propria, quindi in un ambiente di dimensioni ridotte rispetto ad una sala per concerti, abbia comun-

que la sensazione di trovarsi in un ambiente più vasto; infatti le informazioni che il cervello riceve provengono da quattro punti che sono attorno all'ascoltatore e comprendono sia il suono prodotto direttamente dalla sorgente sia il suono riverberato dall'ambiente. In questo modo si ha l'impressione di una maggiore ricchezza sonora e aderenza alla realtà; in effetti, pur essendo ancora ben lontani dalla situazione di ascolto che si ha in un auditorium, con la quadrafonia si è più vicini a tale situazione che con la monofonia o la stereofonia.

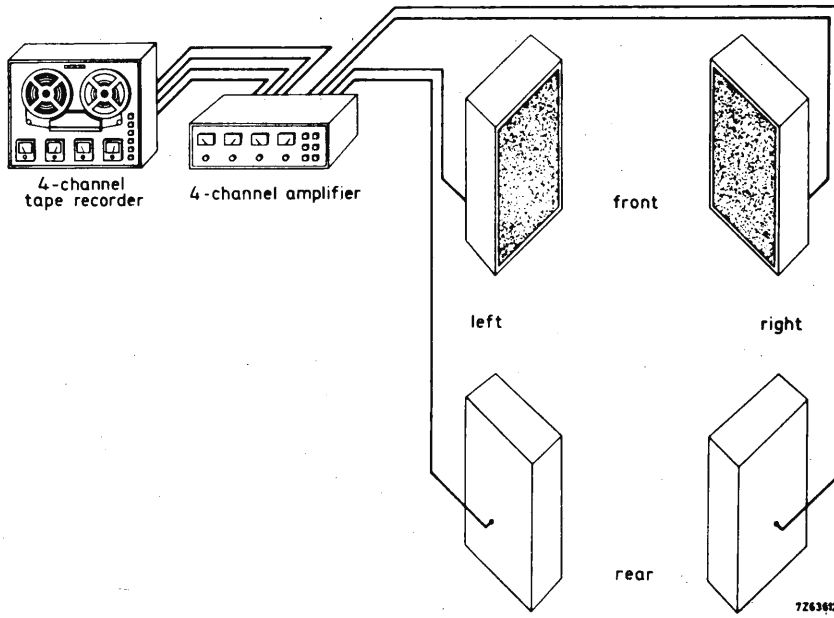


Fig. IV.7 - Riproduzione quadrafonica. (Da Applicazioni Componenti Elettronici Philips).

I problemi posti dall'incisione quadrafonica su disco sono complessi e quindi le soluzioni adottate dalle case costruttrici sono diverse; si tratta infatti di fare in modo che la pista porti registrati ben quattro canali.

1) *Sistema CD-4.*

Un tipo di soluzione per la quadrafonia è stato studiato dalla Japan Victor Company e dalla RCA, ed è il sistema CD-4. Esso è indicato come tipo 4-4-4: cioè significa che i quattro segnali che si vogliono

registrare, anche se soggetti, come vedremo, ad elaborazioni complesse, rimangono sempre quattro informazioni dalla registrazione alla riproduzione; il sistema è perciò detto « discreto » anche se non del tutto propriamente. Prima però di descrivere il sistema CD-4, occorre fare alcuni cenni sulla modulazione di frequenza.

Un segnale elettrico a frequenza acustica può essere utilizzato per modulare un secondo segnale elettrico, cioè per farne variare un parametro. Nel caso della modulazione di frequenza usata in quadrafonia, l'informazione (segnale modulante), che si vuole registrare, fa variare in più o in meno la frequenza di un'onda portante; questa è una tensione sinusoidale, di ampiezza costante e frequenza 30 kHz nel caso di assenza di modulazione.

Come si vedrà nel capitolo sui sintonizzatori, in presenza di modulante, l'onda modulata mantiene l'ampiezza costante, però la sua frequenza è tanto maggiore di 30 kHz quanto più la modulante è positiva, e tanto minore di 30 kHz quanto più la modulante è negativa.

In conclusione l'onda modulata ha un parametro (la frequenza) che varia in funzione dell'informazione (tensione modulante); mediante un demodulatore, è possibile riottenere l'informazione dall'onda modulata.

Nel sistema CD-4 l'uso dell'onda modulata in frequenza consente di sovrapporre nell'incisione due informazioni, senza che venga meno l'intelligibilità: esse cioè possono venire successivamente separate. Questo è possibile in quanto una informazione è un segnale a frequenza acustica e l'altra è una tensione modulata a frequenza portante 30 kHz, che perciò occupa una banda al di sopra del campo audio, pur portando con sé, come modulazione, un segnale audio; le due informazioni occupano bande distinte, quindi possono essere, quando opportuno, nuovamente separate.

Possiamo vedere ora la tecnica di incisione usata nel sistema CD-4. L'incisione è di tipo stereo 45-45.

I segnali audio occupano una banda da 20 Hz a 15 kHz. Essi vengono trattati, prima di essere inviati al bulino incisore, nel seguente modo.

Un fianco della pista viene inciso facendo agire sulla opportuna bobina del bulino stereo due segnali: il primo è la somma del canale sinistro anteriore e del canale sinistro posteriore; il secondo è una portante a 30 kHz, modulata in frequenza dalla differenza dei segnali degli stessi canali. L'altro fianco della pista viene inciso in funzione dei corrispondenti segnali di destra: alla somma del canale destro anteriore e del canale destro posteriore viene sovrapposta la portante a 30 kHz, modulata in frequenza dalla differenza dei segnali degli stessi canali.

In fase di lettura le operazioni sono ugualmente complesse. Dal segnale elettrico risultante dalla lettura di un fianco, occorre separare il segnale audio somma (A) e il segnale sovrapposto modulato, demodulare quest'ultimo in modo da ottenere la differenza fra canale anteriore e posteriore (B); combinare successivamente i segnali somma e differenza (sommando e sottraendo), in modo da ottenere i segnali dei canali anteriore e posteriore. Infatti, riferendoci ai canali di sinistra detti: L_F il canale sinistro anteriore (Left Front), L_R il canale sinistro posteriore (Left Rear), se

$$A = L_F + L_R \qquad \text{e} \qquad B = L_F - L_R \qquad \text{si ha:}$$

$$A - B = 2L_R \qquad L_R = \frac{A - B}{2}$$

$$A + B = 2L_F \qquad L_F = \frac{A + B}{2}$$

Analogo ragionamento si può fare per il canale destro anteriore e il canale destro posteriore.

Questo tipo di incisione è compatibile con la rivelazione stereo: infatti date le sue caratteristiche, non rivela l'onda modulata, ma legge soltanto su un fianco l'informazione totale che proviene da sinistra e sull'altro fianco l'informazione che proviene da destra.

Dalla descrizione si intuiscono i problemi posti dalla realizzazione del sistema e le esigenze qualitative dei vari componenti. Occorrono: circuiti a basso rumore; rivelatori di alta qualità, precisi, che richiedano basse pressioni di lettura, in grado di funzionare in un campo esteso di frequenze; migliore materiale per i dischi; perfetti circuiti di modulazione e demodulazione.

Il sistema CD-4 è un sistema « discreto » solo dal punto di vista teorico; in pratica la separazione fra ogni canale destro e sinistro ha gli stessi limiti che si hanno nella registrazione stereo; la separazione fra ogni canale anteriore e posteriore dipende dalla qualità dei circuiti di modulazione e demodulazione. Una separazione perfetta non è quindi possibile.

2) *Sistemi a matrice.*

Lo stereo-quad (SQ) della CBS e il QS della Sansui sono tra i sistemi più diffusi di affrontare e risolvere il problema della quadrafonia mediante l'uso di matrici. Sono del tipo 4-2-4, cioè i quattro canali, prima della registrazione, vengono codificati in due soli, mediante un dispositivo detto matrice di codifica; nella fase di ripro-

duzione una seconda matrice, detta di decodifica, compie l'operazione inversa, cioè fa passare dai due ai quattro canali originari. La codifica consiste nel sommare i quattro ingressi, in varie proporzioni e relazioni di fase, in modo da ottenere solo due segnali; questi vengono incisi secondo il procedimento stereo; la seconda matrice, nella fase di riproduzione, combina, con le opportune proporzioni e relazioni di fase, i due segnali, in modo da ricostruire i quattro canali originari.

I risultati non sono della stessa qualità di quelli che si ottengono con canali separati, tuttavia l'effetto spaziale è migliore che nella riproduzione stereo. I quattro segnali che si ottengono dopo la decodifica non contengono solo le rispettive informazioni desiderate di ingresso, ma anche una combinazione delle altre informazioni di destra e di sinistra; questo fa sì che il segnale riprodotto non corrisponda esattamente al segnale audio presente al microfono durante la registrazione.

Le diverse matrici ideate dalle case costruttrici si differenziano per il vario modo di codificare e decodificare i canali; la situazione è comunque sempre di compromesso: una buona separazione dei canali anteriori pregiudica la separazione dei canali posteriori e una buona separazione dei canali diagonali pregiudica la separazione dei canali adiacenti. Malgrado questi inconvenienti, i sistemi a base di matrici sono diffusi in quanto presentano, rispetto a metodi « discreti », un costo inferiore sia di incisione sia di rivelazione; inoltre non hanno i problemi posti dalla estesa banda di frequenza (banda audio più spettro dell'onda modulata), che si sono visti nel paragrafo precedente: è possibile quindi utilizzare completamente la banda audio.

3) *Metodi passivi.*

Nella loro più semplice realizzazione consistono nell'utilizzare un sistema stereo, disponendo due altri altoparlanti agli angoli posteriori dell'ambiente di ascolto, collegandoli ai rispettivi altoparlanti anteriori mediante un circuito per il bilanciamento. Questi sistemi utilizzano semplicemente l'informazione esistente sui due canali stereo; in effetti quindi non si può parlare di quadrafonia, anche se questo sistema può dare l'illusione di un maggiore effetto spaziale.

IV.6. La fabbricazione dei dischi

La fabbricazione dei dischi avviene attraverso una successione di fasi. Vediamo le principali.

1) *Registrazione su nastro.*

Il programma sonoro viene registrato su nastro magnetico mediante microfoni e registratore; il processo avviene in diretta, cioè senza interventi successivi e, in molte registrazioni di musica, per sovrapposizione: in quest'ultimo caso, prima si registra la base ritmica e poi si sovrappongono tutti gli altri strumenti. Nel sistema ora più diffuso, che è del tipo a sovrapposizione, si registrano su nastro magnetico a più piste le parti corrispondenti ai diversi strumenti; ad ogni strumento o gruppo di strumenti corrispondono una o più piste; successivamente si riuniscono (*missaggio*) i vari segnali in una unica pista. I registratori usati in questa operazione consentono non solo la sovrapposizione delle diverse piste, ma permettono di intervenire sui segnali acustici, modificando timbri e livelli in modo da ottenere l'effetto voluto. Si capisce quindi il motivo per cui si usa la registrazione magnetica: essa consente di agire sul segnale audio con cancellazioni e parziali modifiche e di verificare immediatamente, passando all'ascolto del nastro, il risultato delle operazioni eseguite.

2) *Passaggio dalla registrazione su nastro alla registrazione su disco.*

Mediante il registratore si legge la pista che porta l'informazione sonora; il segnale elettrico così ottenuto agisce sulla bobina di un fonoincisore: il bulino perciò incide il disco con un solco, in funzione del segnale che si vuole registrare. Si ottiene così l'originale dell'incisione: in esso l'informazione è contenuta sotto forma di solco modulato.

Il materiale usato per l'originale, spesso detto lacca, è nitrato di cellulosa con aggiunta di resine, oli, ecc. Il bulino incisore è di zaffiro, rubino o altro materiale duro; in genere la punta viene riscaldata con una spiralina di filo percorsa da corrente, in modo da facilitare un'incisione regolare del solco: quanto più è liscia la superficie del solco, tanto minore è il rumore di fondo in fase di riproduzione.

In fig. IV.8 a si vede la copia originale, con incisi per semplicità solo tre solchi.

3) *Fabbricazione del master (padre)* (fig. IV.8 b).

Partendo dal disco originale, si copre la superficie incisa di un sottilissimo strato di argento mediante vaporizzazione; successivamente, con procedimenti galvanoplastici, si depositano sulla superficie uno strato di nickel e uno strato di rame. Ne risulta una copia metallica chiamata *master* (padre), che ha dei rilievi dove la superficie originale presentava dei solchi. Esso viene utilizzato per la fab-

bricazione della *madre* (vedi punto successivo); intervenendo solo in questa fase operativa, non si deteriora e quindi può essere conservato per la produzione di nuove madri, quando le stesse si sono consumate per l'uso.

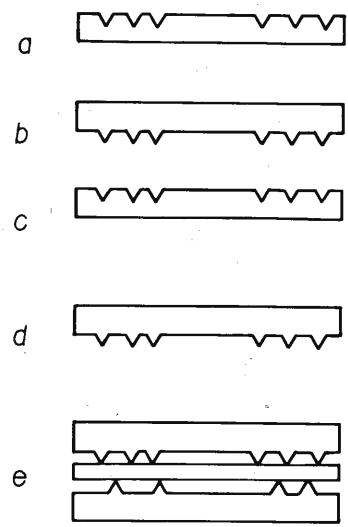


Fig. IV.8 - Fabbricazione del disco:
a) *copia originale;* b) *master;* c) *madre;* d) *stampi;* e) *stampa delle copie.*

4) *Fabbricazione della copia « madre » e degli stampi (stamper)* (fig. IV.8 c, d).

Il master è ricoperto, sempre con procedimenti galvanoplastici, di rame e così si ha la *madre;* uno strato pellicolare deposto preventivamente consente la separazione. La madre presenta perciò dei solchi come l'originale. Si ascoltano tali copie, in modo da controllare se la qualità della registrazione non è andata perduta durante le fasi di lavorazione.

Dalla copia madre si ottengono gli stampi che, come il master, presentano rilievi in corrispondenza dei solchi.

5) *Stampa delle copie* (fig. IV.8 e).

Il materiale col quale si fabbrica il disco viene compresso fra i due stampi che corrispondono ai due lati del disco; si usa una pressa e il materiale è riscaldato a vapore e successivamente raffreddato

dopo la formazione dei solchi. La materia prima è costituita da sostanze termoplastiche (resine sintetiche viniliche): i dischi così ottenuti sono quasi completamente esenti da fruscio, dato che la superficie del solco è ben levigata; hanno inoltre il vantaggio di essere più leggeri, meno fragili e soggetti a minore usura dei dischi in gomma lacca. Inizialmente, infatti, nella fabbricazione dei dischi si usava la gomma lacca, o meglio una mescolanza di gomma lacca, caolino e altre sostanze; ne risultava un materiale di notevole durezza, che però presentava alcuni aspetti negativi: in primo luogo la fragilità; in secondo luogo, date le sue caratteristiche fisiche, non consentiva di tracciare solchi sufficientemente levigati in superficie; infine i dischi erano soggetti a rapida usura. Per questo si preferisce ricorrere attualmente a materiali termoplastici.

CAPITOLO QUINTO

IL PIATTO E I SISTEMI DI TRASCINAMENTO

In questo capitolo esaminiamo i dispositivi mediante i quali si realizza la rotazione del disco. I fini da raggiungere sono sostanzialmente il valore normalizzato e la costanza della velocità di rotazione del piatto e quindi del disco; inoltre è necessario un dispositivo che permetta sia il cambiamento che la regolazione fine di velocità. Le velocità normalizzate sono: 16 2/3; 33 1/3; 45; 78 giri/minuto.

Il problema viene generalmente risolto mediante un sistema costituito dal motore, dal meccanismo di trasmissione del movimento e dal piatto; in alcune soluzioni manca il meccanismo di trasmissione. Le principali caratteristiche richieste e le più comuni realizzazioni pratiche costituiscono il contenuto dei successivi paragrafi.

V.1. Caratteristiche principali del sistema di trascinamento

Esaminiamo i parametri principali da cui poter dedurre la qualità di un sistema di trascinamento.

a) *Precisione della velocità di rotazione.*

È importante che la velocità di rotazione del piatto sia precisa, perché la musica venga riprodotta nella giusta tonalità: è chiaro infatti che, se il disco ruota ad esempio a velocità maggiore di quella prevista, il solco è percorso dallo stilo in tempi più brevi e quindi la frequenza e la tonalità sono più alte.

Secondo le norme DIN gli scostamenti dalla velocità nominale devono essere compresi fra + 1,5 % e — 1 %; infatti l'orecchio umano non è sensibile a variazioni di tonalità inferiori ai valori indicati.

I sistemi di regolazione fine della velocità consentono di portare la velocità di rotazione entro i limiti suddetti.

b) *Fluttuazioni (wow e flutter).*

Sono variazioni di velocità che alterano la frequenza del segnale; esse avvengono, differentemente dal punto precedente, a breve periodo. Infatti se il disco porta inciso un segnale a frequenza fissa, e la velocità varia, varia anche periodicamente la frequenza del se-

gnale elettrico ottenuto, tra un valore massimo f_{max} (quando la velocità è massima) e un valore minimo f_{min} (quando la velocità è minima); il ritmo con cui la frequenza oscilla tra questi due valori dipende dal ritmo di variazione della velocità del disco.

Il *wow* (miagolio) si ha quando la frequenza di un suono, a causa delle variazioni di velocità del disco suddette, oscilla intorno a un valore medio lentamente, cioè con variazioni cicliche inferiori a 10 Hz.

Il *flutter* (scintillamento) si ha quando le variazioni di frequenza avvengono ad un ritmo più rapido del wow.

Le fluttuazioni possono essere misurate con apparecchiature specifiche, che determinano il valore di $\frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \times 100$, con f_o frequenza media (valore di cresta). Spesso si considera il valore efficace (rms), dato da $\frac{f_{max} - f_{min}}{f_o \times \sqrt{2}} \times 100$. Affinché la misura sia attendibile occorre che il disco di prova non abbia eccentricità e sia inserito ben aderente al perno del piatto.

Wow e flutter, nel complesso, non devono superare $\pm$ 0,14 % (rms); si ritiene infatti che la soglia soggettiva, cioè il valore di fluttuazione cui l'orecchio comincia ad essere sensibile, sia di circa 0,3 % (rms) per il wow e di circa 0,15 % (rms) per il flutter.

Spesso nelle prove si preferisce determinare il valore pesato; per esempio le norme DIN prescrivono che il valore pesato delle fluttuazioni debba essere inferiore a $\pm$ 0,15 %. Questo significa che la misura delle fluttuazioni è fatta interponendo nella catena di misura un filtro che attenua più o meno le varie frequenze, a seconda della minore o maggiore sensibilità dell'orecchio alle stesse; si cerca in questo modo di ottenere dei risultati il più possibile aderenti alle sensazioni dell'ascoltatore.

c) *Rumble.*

È un rumore a frequenza molto bassa, dovuto alle vibrazioni del motore e degli organi meccanici di trasmissione.

Queste vibrazioni sono trasmesse al piatto, quindi allo stilo; il fonorivelatore le trasforma in segnale elettrico che viene amplificato e trasformato in onda sonora tramite l'altoparlante.

Per la misura del rumble si ricorre a un disco di prova su cui è inciso un segnale sinusoidale a 1.000 Hz, seguito da solchi non modulati; misurando il livello della tensione all'uscita dell'amplificatore nelle due situazioni (presenza di modulazione a 1.000 Hz e assenza di modulazione), è possibile determinare, mediante il rapporto fra le

due tensioni, il rapporto fra rumble e segnale. Di solito questo rapporto è espresso in dB.

Secondo le norme DIN deve essere inferiore a — 35 dB.

Anche nella misura del rumble si ricorre a filtri che ci permettono di ottenere un valore pesato del rapporto fra segnale e rumore; in questo caso le norme stabiliscono un limite di — 55 dB.

V.2. Il motore

I motori usati nei giradischi sono a corrente alternata e a corrente continua.

a) *Motori a corrente alternata.*

Sono quelli usati più frequentemente e sono di tipo sincrono. In essi la velocità è fissa e dipende solo dalla frequenza della tensione di alimentazione e dal numero delle coppie polari; si hanno tipi multipoli in cui la velocità è di 125, 250, 500 giri al minuto. Nel motore sincrono non è possibile variare la velocità se lo si alimenta a frequenza di rete: per ottenere piccole variazioni di velocità del piatto si deve perciò agire sul sistema di trasmissione del movimento (vedi paragrafo V.3), modificando il rapporto di trasmissione. Una seconda soluzione consiste invece nell'alimentare il motore con un generatore a frequenza variabile in grado di fornire la potenza richiesta; in questo caso basta variare la frequenza per ottenere con grande precisione la velocità di rotazione del piatto.

b) *Motori a corrente continua.*

Per azionare questo tipo di motore occorre una tensione continua, il cui valore ne determina la velocità di rotazione. L'alimentatore è controllato elettronicamente e questo consente la variazione della velocità. Infatti dalla teoria dei controlli automatici si ha che è possibile, mediante trasduttori e reti di controreazione, controllare la velocità di un motore a corrente continua in modo molto preciso. Vantaggio di questo tipo di motore è il basso livello delle vibrazioni, minore che nel tipo precedente; c'è però il problema della scintillazione dovuta alla presenza del collettore e delle spazzole, disturbo che potrebbe essere rilevato dall'amplificatore. Questo inconveniente viene superato nei motori a effetto Hall. In questi manca il collettore e quindi non vi sono i problemi ad esso relativi; inoltre la bassa velocità fa sì che esso possa essere connesso direttamente al piatto senza meccanismi di trasmissione del movimento. Si capisce come questa soluzione consenta livelli di rumble molto bassi, sia per la

bassa velocità sia per la riduzione al minimo di parti meccaniche in movimento.

V.3. La trasmissione del movimento

I sistemi di trasmissione del movimento hanno fondamentalmente due scopi: in primo luogo consentono il movimento del piatto alle velocità normalizzate, che sono più basse delle velocità di rotazione dei comuni motori; in secondo luogo assorbono le vibrazioni del motore in modo che non giungano al piatto e quindi sia basso il livello di rumble. Le soluzioni più comunemente adottate sono la trasmissione mediante puleggia, la trasmissione mediante cinghia e la trasmissione diretta.

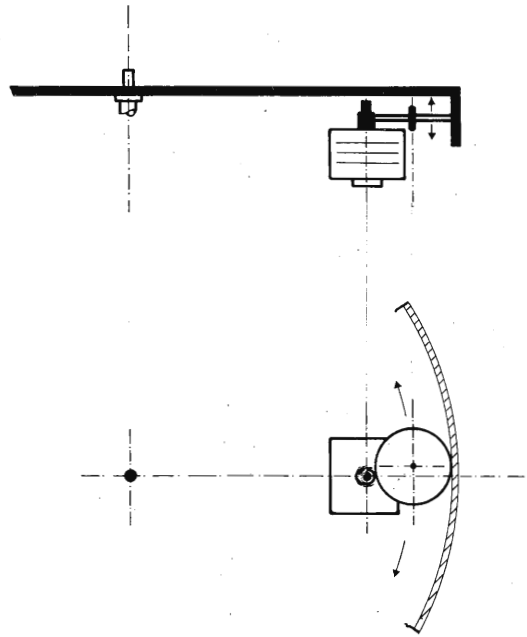


Fig. V.1 - Trasmissione del movimento mediante puleggia.

a) *Trasmissione mediante puleggia.*

La figura V.1 dà un esempio di trasmissione del movimento con possibilità di due velocità di rotazione del piatto. Una puleggia a due piani è calettata sull'albero motore; il movimento si trasmette dall'al-

bero motore alla puleggia di rinvio e da questa al bordo interno del piatto. Spostando la suddetta puleggia in alto e lateralmente, essa viene a trovarsi tra il piatto e la sezione della puleggia fissa all'albero di diametro minore; questo consente una velocità di rotazione del piatto più bassa. Naturalmente, per ottenere le quattro velocità di rotazione del piatto normalizzate, occorre calettare sull'albero del motore una puleggia a quattro piani.

Si può presentare la necessità di regolazione fine della velocità agendo su questo meccanismo di trasmissione, quando il motore è del tipo sincrono. Il problema è risolto calettando sull'albero motore una puleggia con sezione a tronco di cono, come si vede in fig. V.2.

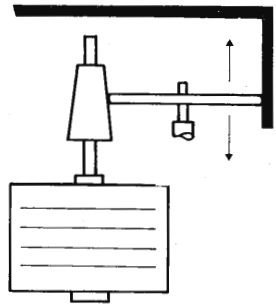


Fig. V.2 - Regolazione della velocità del piatto mediante puleggia a tronco di cono.

Spostando la puleggia di rinvio in basso, essa viene a trovarsi successivamente a contatto con punti della puleggia sull'albero che corrispondono a circonferenze di diametro sempre maggiore; si ha quindi un aumento della velocità di rotazione della puleggia di rinvio e perciò del piatto. È in fondo lo stesso problema della variazione di velocità di cui si è parlato sopra: solo che qui, data la sezione a tronco di cono, la velocità può essere regolata con continuità tra i due valori estremi, che corrispondono ai diametri minimo e massimo della sezione.

Numerosi sono i problemi di natura meccanica posti da questo tipo di trasmissione. La puleggia di rinvio deve soddisfare a diverse esigenze: per ridurre il rumble, essa deve essere flessibile in modo tale da assorbire le vibrazioni del motore e non trasmetterle al piatto; d'altra parte, per ridurre le fluttuazioni della velocià del piatto, deve essere rigida in modo da non deformarsi e quindi non presentare irregolarità alla superficie interessata alla trasmissione del movimento.

Inoltre il sistema meccanico, mediante il quale la puleggia è posta in ognuna delle posizioni richieste (corrispondenti alle quattro velocità normalizzate), deve garantire un posizionamento corretto e una pressione opportuna fra la puleggia e le altre parti interessate al movimento, cioè puleggia motrice e bordo interno del piatto: da un lato una pressione insufficiente potrebbe essere causa di slittamenti e quindi di irregolarità di trasmissione del movimento; dall'altro lato una pressione eccessiva potrebbe produrre deformazioni della puleggia e quindi fluttuazioni.

b) *La trasmissione mediante cinghia.*

In questo tipo di meccanismo, il movimento è trasmesso da una puleggia calettata sull'albero motore al piatto mediante una cinghia. In figura V.3 è riportato un esempio di realizzazione pratica.

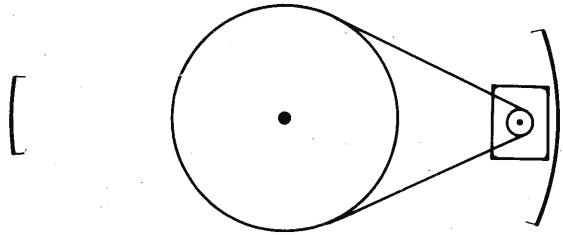


Fig. V.3 - La trasmissione del movimento mediante cinghia.

Caratteristica di questo sistema è evidentemente la semplicità; il numero di componenti necessari è limitato. Questa volta è la cinghia l'elemento che assorbe le vibrazioni del motore e impedisce che influenzino il movimento del piatto; l'eliminazione della puleggia di rinvio consente di evitare i disturbi prodotti dalle imperfezioni della puleggia stessa, di cui si è parlato nel paragrafo precedente. Si hanno in sostanza i vantaggi tipici della trasmissione a cinghia: è un tipo di trasmissione silenziosa, che disaccoppia efficacemente motore e piatto dal punto di vista delle vibrazioni indesiderate.

Il problema di avere a disposizione più velocità è risolto usando una puleggia a più piani calettata sull'albero motore: il cambiamento di velocità si ottiene spostando la cinghia da una sezione all'altra.

La figura V.4 mostra come sia possibile ottenere la regolazione fine della velocità, nel caso che si usi un motore sincrono. La puleggia è a due piani (*A, B*), per avere le due velocità più comuni di rotazione del disco; ogni sezione però non ha diametro costante, ma

esso varia lungo l'asse verticale dando alla puleggia un caratteristico profilo a *oliva*: al centro di ogni sezione il diametro è massimo e diminuisce in basso e in alto. Se si inclina l'asse di rotazione di motore e puleggia a sinistra o a destra, dalla posizione *a-a* alla posizione *b-b* oppure *c-c*, si può fare in modo che il contatto cinghia-puleggia avvenga in zone aventi diametro diverso, cui corrispondono velocità periferiche diverse.

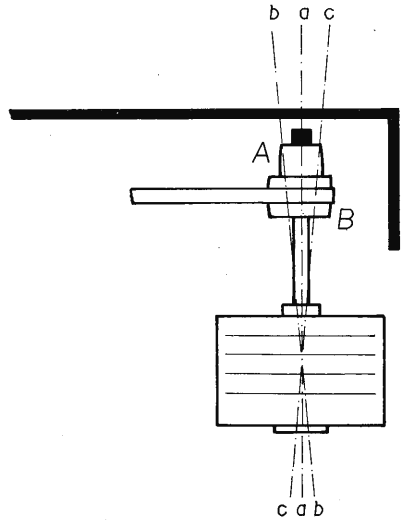


Fig. V.4 - Regolazione fine della velocità mediante puleggia dal profilo ad oliva.

In sintesi è come se ad una puleggia di diametro *D*, si sostituisse un'altra puleggia di diametro leggermente inferiore *d*: la velocità della cinghia e quindi del piatto è leggermente inferiore. L'inconveniente di questa soluzione è nel fatto che le possibilità di regolazione sono limitate; infatti il profilo non può presentare forti variazioni di diametro.

c) *La trasmissione diretta.*

In questi tipi di trasmissione il piatto è direttamente calettato sull'asse del motore; l'unica parte in movimento è perciò il complesso rotore-piatto. Si riduce così al minimo il numero delle parti meccaniche in movimento e quindi la possibilità che il piatto sia soggetto a vibrazioni. L'estrema semplicità dal punto di vista meccanico comporta però la necessità di risolvere in altro modo i problemi connessi

alla velocità di rotazione del piatto: la velocità del motore deve coincidere con la velocità del piatto e perciò deve essere bassa; occorre che il motore consenta di ottenere le velocità normalizzate; infine vi è il problema della regolazione fine della velocità.

I motori a effetto Hall, come si è già detto nel paragrafo precedente, hanno permesso la realizzazione pratica della trasmissione diretta: la loro velocità è bassa e può essere controllata elettronicamente. In questo modo i problemi meccanici di trasmissione del moto sono stati trasformati in problemi di controllo elettronici, con evidenti vantaggi di semplicità, compattezza e assenza di vibrazioni dovute agli organi di trasmissione.

La trasmissione diretta, con motore a effetto Hall, è quindi la soluzione che al momento attuale consente le prestazioni migliori dal punto di vista tecnico; il limite alla sua diffusione è dovuto a motivi di costo, uniti al fatto che le soluzioni di trasmissione a cinghia sono state perfezionate al punto tale da dare risultati già ampiamente soddisfacenti, tenuto conto delle esigenze attuali. D'altra parte, data la richiesta di prestazioni sempre migliori, è probabile che verso la trasmissione diretta si orientino in futuro le domande degli interessati.

V.4. Il piatto

È l'ultimo dispositivo della catena mediante la quale si realizza la rotazione del disco. È importante che la massa del piatto sia grande. Infatti le variazioni di velocità di motore e meccanismi di trasmissione, insufficientemente ammortizzate nei dispositivi prima del piatto, si trasformano in variazioni minori di velocità del piatto stesso, se la sua massa e perciò il suo momento di inerzia sono grandi. Questo comporta però degli inconvenienti: in primo luogo è necessario un supporto sufficientemente robusto; in secondo luogo cresce il tempo di avvio, il tempo cioè occorrente per raggiungere, da velocità zero, la velocità di regime. Si potrebbe ovviare a quest'ultimo inconveniente usando motori di maggiore potenza, i quali però a loro volta richiedono schermature efficaci, in quanto sono origine di disturbi di natura elettromagnetica.

Il piatto deve consentire una perfetta aderenza del disco al perno centrale; una eventuale eccentricità sarebbe causa di fluttuazioni.

CAPITOLO SESTO

IL BRACCIO

La funzione del braccio è di sostenere il fonorivelatore, permettendogli di seguire, nel modo più fedele possibile, il solco del disco. Le caratteristiche cui deve soddisfare e le diverse soluzioni tecniche realizzate costituiscono l'oggetto di questo capitolo.

VI.1. Gli attriti

Il movimento del braccio deve poter avvenire sia in senso verticale che orizzontale rispetto al piano del disco; le forze d'attrito devono essere limitate in modo da consentire il movimento senza difficoltà. Un attrito eccessivo nella rotazione attorno all'asse verticale (e cioè nel piano orizzontale) contrasta il movimento del braccio e quindi della punta lettrice verso il centro del disco; la punta è perciò soggetta ad una forza in senso contrario al movimento radiale, forza che non è dovuta al segnale registrato e che perciò andrebbe eliminata. Per quanto riguarda la rotazione attorno all'asse orizzontale (e perciò nel piano verticale), una forza d'attrito eccessiva impedisce che i movimenti del braccio seguano le ondulazioni del disco: se la superficie del disco ha un'ondulazione verso l'alto, aumenta in modo eccessivo la pressione della punta sul disco (peso di lettura: vedi paragrafo VI.5); se l'ondulazione è verso il basso, c'è il rischio che la puntina lasci il contatto con il solco. In generale l'influenza dell'attrito è legata al peso di lettura: minore è quest'ultimo, maggiore è l'importanza che assumono le forze d'attrito.

Si hanno varie tecniche per rendere basso il valore dell'attrito: bracci a un solo perno (unipivot), a contropunte, a lame di coltello, a cuscinetti.

Il tipo unipivot è quello che consente i valori più bassi di attrito. Un esempio schematico è dato in figura VI.1.

Si vede come il braccio sia appoggiato ad una punta conica, che ne consente il movimento sia in senso orizzontale sia in senso verticale. Data la delicatezza della connessione, si hanno diverse tecniche di realizzazione dell'articolazione; nell'esempio di figura VI.1 si vede come la punta di appoggio sostenga una coppa cui è solidale il brac-

cio. Soluzioni di questo tipo hanno, come si è visto, il pregio di un bassissimo valore di attrito, essendo il contatto tra superfici estremamente ridotte; il difetto maggiore è l'instabilità, dovuta proprio alla esiguità della superficie di contatto.

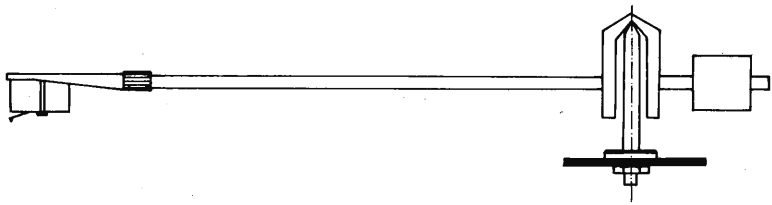


Fig. VI.1 - Braccio di tipo unipivot.

Le altre soluzioni di cui si è parlato e che sono usate nella meccanica di precisione (cuscinetti, contropunte, lame di coltello) hanno caratteristiche inferiori dal punto di vista dell'attrito, anche se possono essere considerate eccellenti, purché realizzate in modo accurato; sono migliori dal punto di vista della robustezza e stabilità.

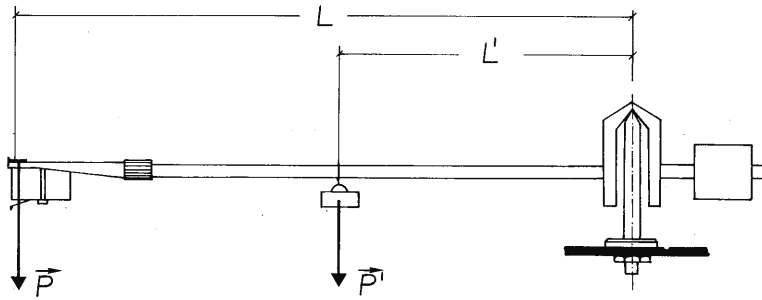


Fig. VI.2 - Misura dell'attrito verticale.

La misura dell'attrito può essere fatta mediante dinamometro; però da un lato questo strumento non è molto diffuso e dall'altro lato raramente le scale arrivano fino a valori dell'ordine del milligrammo, che sono caratteristici dei bracci attuali. Si può perciò ricorrere agli accorgimenti di figura VI.2 per misurare l'attrito verticale.

Bilanciato il braccio, si appoggiano sulla testina, in corrispondenza dello stilo, dei pesi campione di 1 milligrammo, fino a che lo stilo comincia ad abbassarsi. Il peso complessivo, in milligrammi, dà

il valore della forza d'attrito; evidentemente si tratta dell'attrito statico, dato che si è determinata la forza che dà inizio al moto. Se non si hanno a disposizione pesi campione di valore così basso, o in numero sufficiente, si può ricorrere ad un unico peso di valore P' e farlo scorrere sul braccio, appoggiandolo direttamente o con un piccolo cappio di filo. Vale la formula delle leve, la quale ci dice che il peso P' produce lo stesso effetto di un peso P all'altezza dello stilo, con

$$P = \frac{P' L'}{L}.$$

Per quanto riguarda l'attrito orizzontale, si può ricorrere, sempre dopo avere bilanciato il braccio, al metodo approssimato schematizzato in figura VI.3.

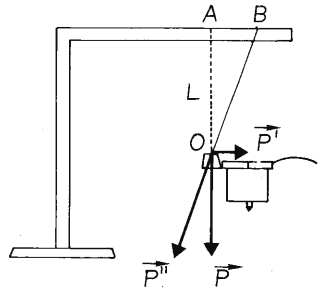


Fig. VI.3 - Misura dell'attrito orizzontale.

Il peso P è sostenuto da un filo lungo L, ed è a contatto della testina. Si allontana l'estremo superiore del filo dalla posizione « A » fino a che la forza **P'** esercitata dal peso sulla testina le fa iniziare il movimento verso destra. Il peso **P** si può pensare scomposto nelle due componenti **P'** perpendicolare alla superficie della testina e **P''** nella direzione OB; dalla similitudine fra il triangolo OAB e il triangolo formato da **P** e **P'**, si può calcolare la forza **P'** che determina il movimento della testina $P' = P \cdot AB/L$ (il significato dei simboli usati risulta in figura). La misura è approssimata, non essendo il peso puntiforme e concentrato in O; si può parzialmente correggerla, tenendo conto, in L, del punto di contatto peso-testina. Comunque la misura è semplice e dà un'idea abbastanza precisa dell'attrito nel piano orizzontale.

VI.2. L'errore di tangenza

È detto anche *errore di pista* e *lateral tracking error*. Esso è dovuto al fatto che, nell'incisione, la traiettoria del bulino è radiale, mentre nella fase di riproduzione la punta lettrice descrive una traiettoria curva, essendo il braccio incernierato in un punto. Esaminiamo in primo luogo la fase di registrazione (fig. VI.4).

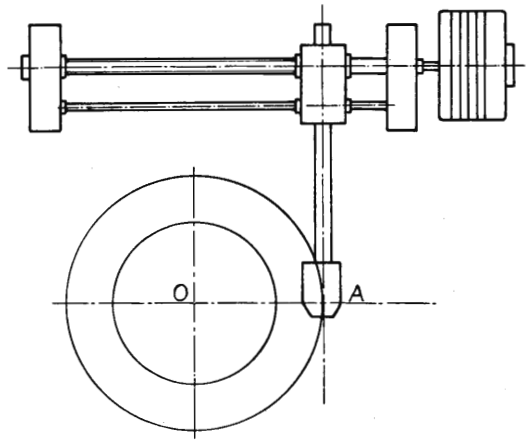


Fig. VI.4 - L'incisione del solco.

La punta che incide (bulino o cutter) è di zaffiro o rubino sintetico o altro materiale duro. Essa è sostenuta da un braccio che si sposta orizzontalmente, in modo che il bulino abbia una traiettoria radiale (da *A* a *O*); un sistema vite e madrevite consente di trasformare il movimento rotatorio del motore nel movimento traslatorio del braccio, che è solidale con la madrevite. La composizione del movimento rotatorio del disco e di quello radiale del bulino fa sì che il solco sia a spirale; però, essendo il passo di incisione molto piccolo, le spire del disco possono essere considerate tante circonferenze di diametro sempre minore passando da *A* a *O;* perciò si può considerare il bulino sempre tangente al solco (o meglio: il piano verticale che contiene l'asse dello stilo si può considerare perpendicolare al raggio *AO*).

Nella fase di lettura, perché la riproduzione sia fedele, devono essere rispettate le stesse condizioni, quindi la punta lettrice deve essere tangente al solco. Essendo però i bracci classici incernierati in

un punto, la punta lettrice *S* non può descrivere una traiettoria radiale, ma si sposta secondo un arco di cerchio *ASO* di centro *C* e raggio *OC* (fig. VI.5).

Si vede dalla figura che il piano verticale che contiene l'asse dello stilo e l'asse del braccio non è tangente al solco; la sua intersezione col piano del disco è una retta *a-a* che forma con la tangente *b-b* al solco nel punto *S* un angolo Φ; questo angolo definisce l'errore di tangenza.

Questo errore è importante, in quanto è causa di una distorsione di seconda armonica; in pratica si trova che la distorsione è direttamente proporzionale, oltre che all'angolo Φ, anche alla velocità con cui è stato registrato il segnale ed è inversamente proporzionale alla velocità di lettura. Si vede così che la distorsione è maggiore in corrispondenza dei solchi di diametro minore, in quanto la velocità di lettura, cioè la velocità dello stilo rispetto al disco, è minore. Si possono avere valori di distorsione superiori al 5 %, ragione per cui è

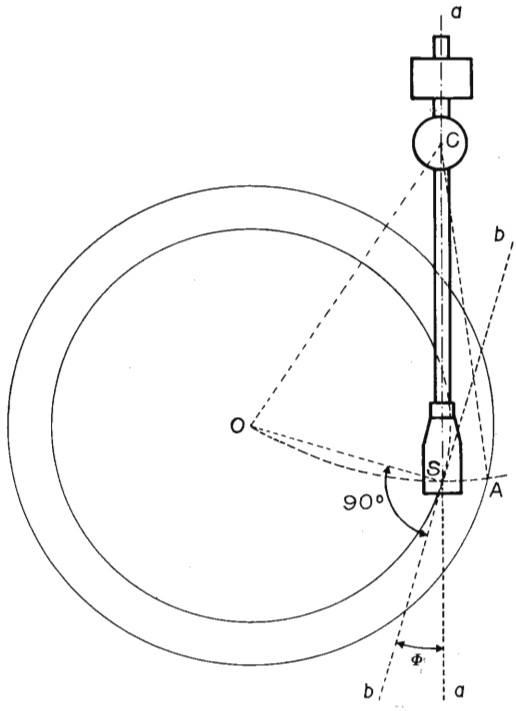


Fig. VI.5 - Movimento del braccio e dello stilo nella fase di lettura del solco.

indispensabile ricorrere a metodi di compensazione dell'errore di tangenza.

L'entità di questo errore dipende anche dalla lunghezza *SC* del braccio; più lungo è il braccio, più l'arco *OA* tende a confondersi con la corda e cioè con il raggio. Però l'aumento di pochi centimetri di lunghezza non dà benefici significativi e d'altra parte bracci lunghi presentano due inconvenienti: in primo luogo la notevole dimensione di ingombro; in secondo luogo l'aumento della massa del braccio e quindi dell'inerzia (questo problema è trattato nel paragrafo VI.7). Si preferisce perciò ricorrere alla modifica del braccio tradizionale o alla sua sostituzione con sistemi di lettura più complessi (bracci tangenziali e bracci articolati).

a) *Bracci tradizionali modificati.*

Si costruisce il braccio in modo che la sua lunghezza, cioè la distanza perno-stilo *CS,* sia maggiore del segmento *CO*: la differenza *CS-CO* è spesso detta *overhang* (sbalzo) e nella figura VI.6 è indicata

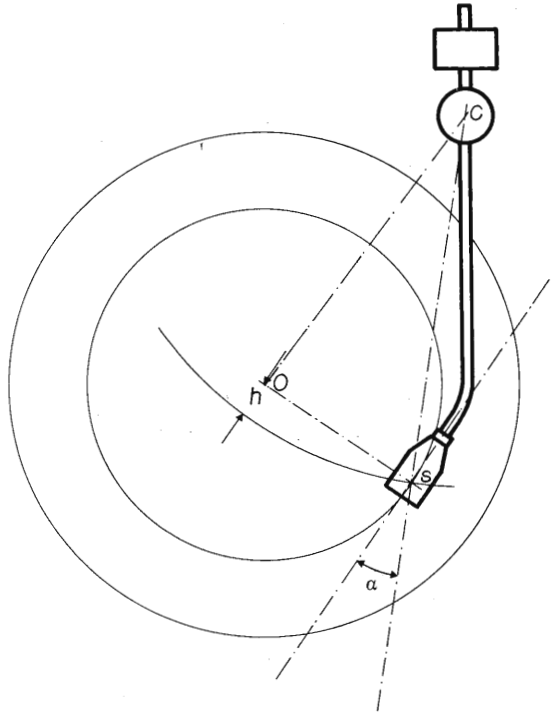


Fig. VI.6 - Braccio modificato per ridurre l'errore di tangenza.

con h; indica in sostanza il segmento di cui lo stilo va oltre il centro del disco.

Si modifica inoltre la forma del braccio, in modo che la testina presenti un'angolazione (*offset*) rispetto alla congiungente la punta lettrice S con il perno C. L'offset è indicato in figura con α.

È possibile, regolando in fase di progetto h e α, ottenere l'annullamento dell'errore di tangenza non in uno solo, ma in due punti della superficie del disco; in particolare, essendo la distorsione massima

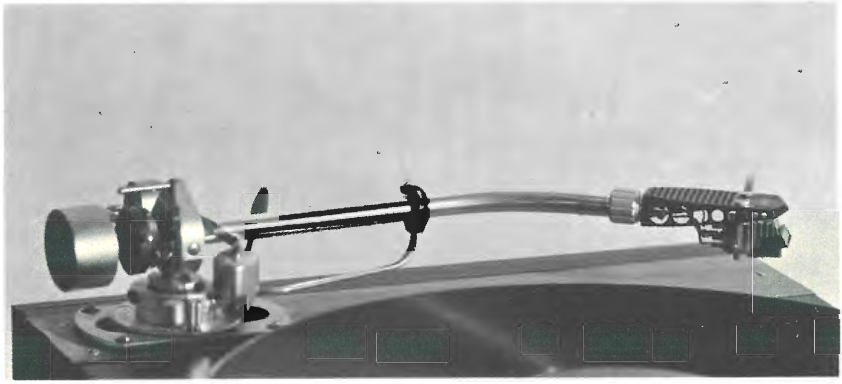


Fig. VI.7 - Esempio di braccio tradizionale modificato (braccio della S.M.E.).

in corrispondenza del solco di diametro minimo, si cerca di annullare l'errore di tangenza sulla spira finale e di contenere le variazioni di Φ entro determinati limiti su tutto il disco. A parità di lunghezza del braccio, agendo su h e α, è possibile scendere a valori dell'errore di tangenza al di sotto di 3 gradi e a distorsioni al di sotto del 2 %. La lunghezza del braccio si sceglie superiore ai 210 mm (di solito è compresa fra 210 e 240 mm), con un valore di overhang inferiore ai 18 mm e un offset massimo di 25 gradi. Con queste caratteristiche geometriche del braccio, si richiede un errore di tangenza inferiore a 1,5 gradi sulla spira esterna del disco di 30 cm e un errore di tangenza trascurabile sulla spira terminale. Le figure VI.6 e VI.7 rappresentano due bracci di lettura di questo tipo.

b) *Bracci tangenziali.*

La loro struttura è analoga a quella dei sistemi registratori, illustrati in figura VI.4. Il motore trascina in rotazione la vite che, a sua volta, determina il movimento traslatorio della madrevite e perciò del

braccio e dello stilo. In questo modo il braccio è tangente ai solchi e la punta lettrice si trova perciò nelle stesse condizioni del bulino incisore.

Potrebbe sembrare inutile l'uso del motore e del sistema vite-madrevite per determinare lo spostamento del braccio nel piano orizzontale: in linea di principio, sarebbe sufficiente una guida e, come nel caso del braccio tradizionale, il solco trascinerebbe la punta lettrice verso il centro del disco. In effetti ciò non è possibile, in quanto in questa realizzazione, nei confronti del caso precedente a),

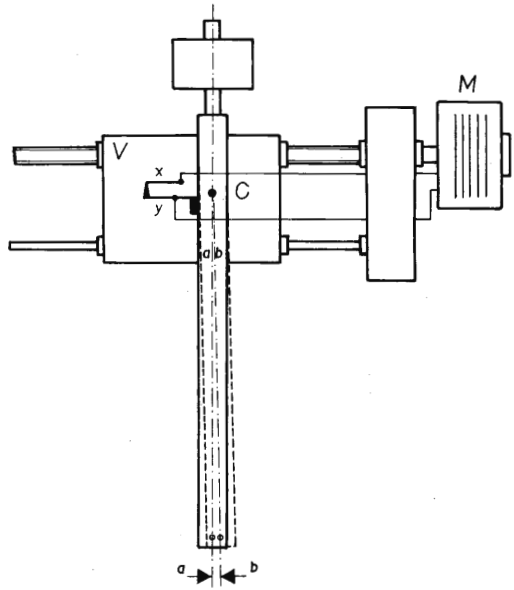


Fig. VI.8 - Braccio tangenziale. Particolare del comando elettromeccanico.

sono molto maggiori la massa, l'inerzia e gli attriti. Si rende perciò indispensabile l'uso di un motore il quale consenta il movimento del braccio nel piano orizzontale. Questo però crea il problema dell'asservimento del movimento del braccio alla rotazione del disco: il braccio deve spostarsi con la stessa velocità con cui il braccio registratore incideva il disco. Si ricorre a un sistema passo-passo, con comando fotoelettrico o elettromeccanico.

In figura VI.8 è riportata una schematizzazione di un comando elettromeccanico. La lamella *y*, collegata al braccio, è a contatto con

la lamella *x*; l'interruttore *x-y*, chiuso, comanda il movimento del motore *M* coassiale con la vite. La madrevite *V* si sposta verso sinistra e l'asse del braccio passa dalla posizione *a-a* alla posizione *b-b*; la piccola rotazione attorno a *C* è sufficiente ad interrompere il contatto *x-y* ed il motore si ferma. In seguito alla rotazione del disco, l'asse del braccio ruota attorno al punto *C* (in quanto la punta lettrice è trascinata dal solco), fino a riassumere la posizione *a-a*; l'interruttore *x-y* si richiude e il ciclo riprende. Il movimento dello stilo è radiale, come avveniva per il bulino nella fase di incisione.

c) *Bracci articolati.*

Hanno la struttura di base del quadrilatero articolato, come si vede dalla figura VI.9. La testina ora è incernierata al braccio *CA* nel punto *A* e al segmento *BC'* nel punto *B*. Si vede dalla struttura

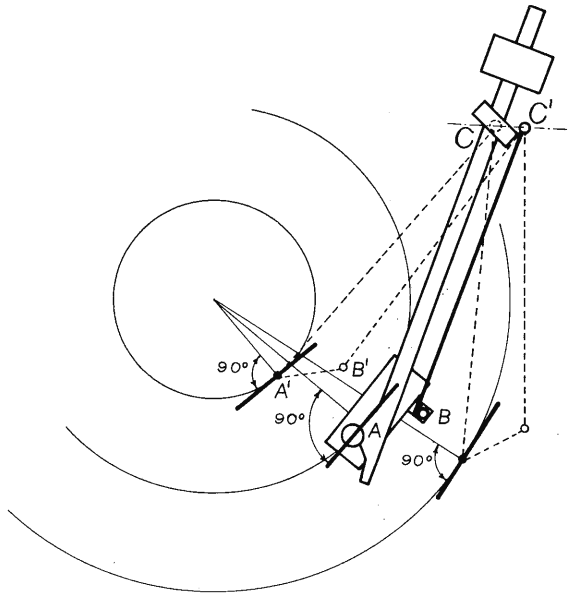


Fig. VI.9 - Esempio di braccio articolato: schematizzazione.

del quadrilatero che, mentre lo stilo passa dal punto *A* al punto *A'*, la testina ruota, tendendo a mantenersi perpendicolare al raggio e quindi tangente al solco. La distorsione è perciò ridotta a livelli molto bassi. Dal punto di vista dell'attrito, i bracci articolati sono però di qualità inferiore ai bracci tangenziali con motore passo-passo.

VI.3. La perpendicolarità della punta lettrice alla superficie del disco

La testina e la punta lettrice appoggiata al disco, viste dalla parte anteriore, devono apparire come in figura VI.10 a: il piano di simmetria della testina e quindi la punta lettrice devono formare un angolo di 90° col piano del disco. Regolando l'altezza del braccio in rapporto al disco, si fa in modo che il braccio sia parallelo al disco

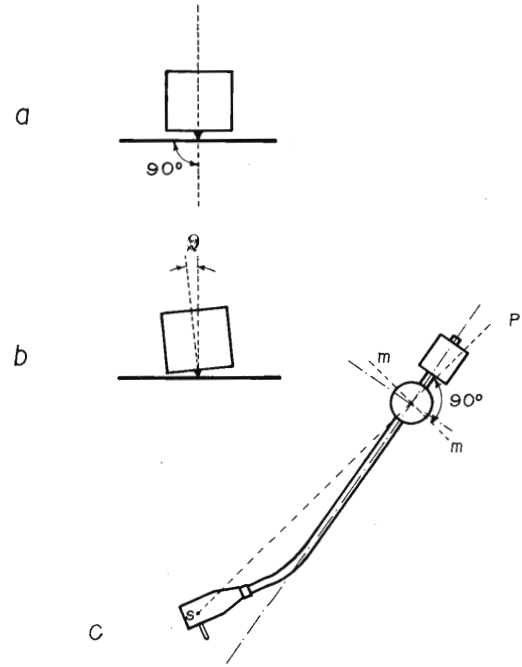


Fig. VI.10 - a) *punta lettrice in posizione corretta, perpendicolare al piano del disco;* b) *esempio di punta lettrice non perpendicolare al piano del disco;* c) *tipo di braccio in cui può verificarsi il difetto di perpendicolarità.*

e così si riesce a realizzare la perpendicolarità tra puntina e disco: infatti il braccio è parallelo al disco e lo stilo, essendo perpendicolare al braccio, è perpendicolare al disco.

È importante eliminare il difetto di mancanza di perpendicolarità: infatti un posizionamento della testina come in figura VI.10 b è

causa di distorsioni, di mancanza di uniformità di pressione della puntina sulla superficie del solco e quindi di dissimmetria di usura della puntina e del disco.

La presenza o meno di perpendicolarità è determinata, oltre che dalla mancanza di parallelismo fra braccio e piatto, anche dal tipo di braccio usato. Ad esempio, nel caso in cui la testina è sul prolungamento di un braccio rettilineo (fig. VI.5), qualunque sia l'inclinazione del braccio sul piano orizzontale, il piano di simmetria della testina è sempre perpendicolare all'asse orizzontale di rotazione e perciò è perpendicolare al disco. In figura VI.10 c, invece, la testina è inclinata di un angolo rispetto al braccio, per compensare l'errore di tangenza; se si allontana il braccio dalla posizione orizzontale, facendolo ruotare attorno all'asse *m-m,* il piano di simmetria non rimane perpendicolare al disco, ma si inclina di un angolo θ.

Per eliminare il difetto di parallelismo fra disco e braccio, le soluzioni più frequenti sono:

1) si utilizza come articolazione un giunto cardanico: esso permette qualsiasi posizionamento della puntina e quindi consente la perpendicolarità della stessa al disco;

2) l'asse di rotazione orizzontale (fig. VI.11) *m-m* è inclinato rispetto all'asse del braccio in modo da essere perpendicolare al

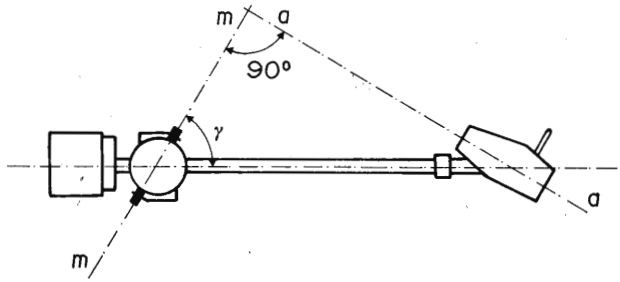


Fig. VI.11 - Braccio in cui l'asse di rotazione è perpendicolare al piano di simmetria della testina.

piano di simmetria della testina *a-a.* In questo modo il braccio deve formare sempre, nel suo movimento verticale, un angolo γ con l'asse *m-m* e obbliga lo stilo a rimanere perpendicolare al disco.

VI.4. Lo skating

Si indica anche con spinta laterale o forza centripeta.

È la forza che spinge la puntina lettrice verso il centro del disco nei bracci del tipo classico modificato (paragrafo VI.2 a), cioè aventi la testina con compensazione dell'errore di tangenza. In figura VI.12 si vede come si origina lo skating.

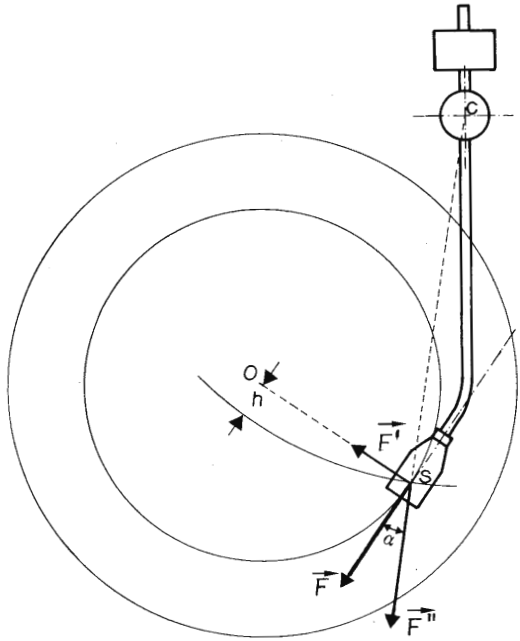


Fig. VI.12 - Lo skating.

Nella rotazione del disco la punta lettrice è soggetta a una forza **F**, tangente al solco nel punto di contatto *S*, dovuta all'attrito fra stilo e solco. **F** dipende dalla forza (peso) esercitata dalla punta di lettura sul solco e dal coefficiente d'attrito fra punta e solco, che a sua volta è determinato dalla forma della punta di lettura e dalle caratteristiche elastiche del disco. Per vederne più chiaramente gli effetti, la forza **F** può essere scomposta nelle due componenti **F'** e **F''**, rispettivamente nelle direzioni del raggio *SO* e della congiungente *SC*. La forza **F''** non ha effetto sul braccio, in quanto la sua retta di applicazione passa per il perno *C*; perciò non può far ruotare il braccio

né muoverlo nella direzione *CS* in quanto il perno è fisso. La forza **F′** invece, diretta verso il centro del disco, tende a muovere il braccio di lettura verso il centro del disco e per questo si chiama spesso forza centripeta; il movimento è possibile in quanto il braccio può ruotare attorno al perno *C*. Gli effetti negativi di questa forza centripeta sono diversi. La forza **F′** è causa di una differenza di pressione dello stilo nei riguardi delle pareti interna ed esterna del solco: la parete interna è maggiormente caricata che la parete esterna. Ciò in primo luogo disturba il bilanciamento stereo nel caso di testina stereo; comunque in generale è causa di una situazione di lettura differente dalle condizioni di incisione descritte nel paragrafo VI.2 e quindi di distorsione.

In secondo luogo è causa di usura maggiore sul fianco interno del disco e di usura non uniforme della punta. Si rende necessario infine, per un dato peso di lettura (vedi paragrafo VI.5), una forza di appoggio maggiore, in modo da compensare la diminuzione di pressione sulla parte esterna del solco.

Per rivelare la presenza dello skating, si ricorre a un disco non inciso e, dopo averlo messo in rotazione, si appoggia la punta di lettura sulla sua superficie; il braccio si muove verso il centro del disco, dimostrando così la presenza della forza centripeta **F′**.

Si sono espressi dei dubbi sulla efficacia dei dispositivi antiskating, cioè dei dispositivi che compensano la forza centripeta **F′**. In primo luogo si è osservato che esistono altre cause che influenzano negativamente la riproduzione in modo molto maggiore dello skating (per esempio la polvere nei solchi). In secondo luogo si è notato che la forza **F′** è difficilmente valutabile in anticipo e non è costante, dati i fattori fisici che la determinano (peso di lettura, velocità di modulazione, dimensioni dello stilo); perciò non è possibile una correzione assoluta.

Malgrado questo, i dispositivi antiskating corredano la generalità dei bracci di qualità. Infatti lo skating esiste, grandi o piccoli che siano i suoi effetti negativi, e l'applicazione di qualche correzione perciò dà dei benefici, soprattutto se gli attriti nel perno *C* sono piccoli; se non altro prolunga la vita di puntine e dischi.

I dispositivi antiskating sono di tipo magnetico, a molla e a peso calibrato; si basano tutti sull'idea di applicare al braccio una forza diretta verso l'esterno o una coppia che tenda a fare ruotare il braccio verso l'esterno del disco. Nel dispositivo a molla, è la molla che si oppone alla rotazione del braccio attorno al perno *C*; in quelli magnetici si sfrutta la repulsione fra due magneti che vengono più o meno avvicinati.

In figura VI.13 si vede un dispositivo in cui si usa un peso calibrato che, mediante un filo, applica una forza ad un'asta graduata. Questa forza tende a spostare il braccio verso l'esterno e il suo effetto è maggiore quanto più il suo punto di applicazione lungo l'asta è lontano dall'asse di rotazione verticale (la coppia è maggiore).

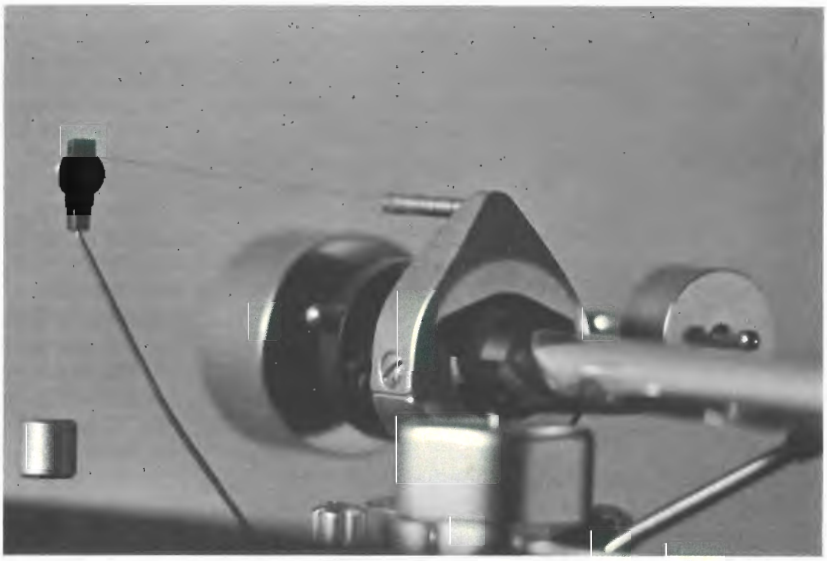


Fig. VI.13 - Dispositivo antiskating realizzato mediante peso (braccio della S.M.E.).

La regolazione è fatta utilizzando il disco con parti non incise, di cui si è parlato precedentemente. Dopo averlo messo in rotazione, si appoggia la puntina sulla superficie e si regola il dispositivo antiskating, finché il braccio rimane immobile. Ad esempio nel caso della figura VI.13 la regolazione si effettua spostando il filo che sostiene il peso da una tacca all'altra dell'asta solidale al braccio.

VI.5. Bilanciamento statico e peso di lettura

Per *peso di lettura* si intende la forza verticale che spinge la punta di lettura verso il basso, in modo da stabilire il contatto con la superficie del solco. Il peso di lettura necessario dipende dalle caratteristiche della testina: i valori medi sono compresi fra 1,5 e

5 grammi. Il braccio deve presentare la possibilità di una regolazione. Innanzitutto deve essere possibile il bilanciamento statico, cioè l'equilibramento attorno all'asse di rotazione orizzontale: ciò è ottenuto mediante il contrappeso, ben visibile in diverse figure del presente capitolo. Il bilanciamento deve essere possibile per un ampio campo di pesi della testina: in genere da un minimo di alcuni grammi ad un massimo di qualche decina di grammi. I valori limite sono controllabili: si rimuove la testina, si appoggiano sulla conchiglia porta-testina del braccio dei pesi campione e si cerca di ottenere il bilanciamento agendo sul contrappeso. L'equilibramento sarà possibile per valori del peso compresi fra un minimo e un massimo: questi sono perciò i limiti entro cui può stare il peso di una testina perché sia montabile sul braccio.

In secondo luogo deve essere presente un dispositivo che consenta la regolazione del peso di lettura; di solito è del tipo a peso supplementare o a molla.

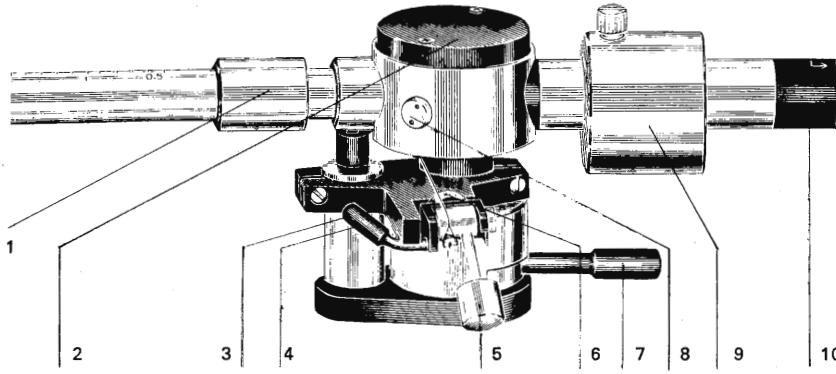


Fig. VI.14 - Particolare di braccio Audio Technica AT-1009 in cui sono messi in evidenza: 1) *Pesetto scorrevole per la regolazione del peso di lettura;* 2) *Carter;* 3) *Dispositivo per sollevamento braccio;* 4) *Dispositivo di regolazione per la compensazione dello skating;* 5) *Peso antiskating;* 6) *Scala di regolazione dell'antiskating;* 7) *Dispositivo per la regolazione dell'altezza del braccio;* 8) *Perno per il movimento verticale;* 9) *Contrappeso principale;* 10) *Regolazione bilanciamento orizzontale.*

In figura VI.14 si vedono il contrappeso principale 9 e il dispositivo 10 di regolazione del contrappeso sul prolungamento del braccio per il bilanciamento statico; il peso di lettura è determinato da un pesetto 1 scorrevole sul braccio.

Per verificare la precisione della regolazione del peso di lettura, si può ricorrere a una bilancia appositamente costruita (fig. VI.15).

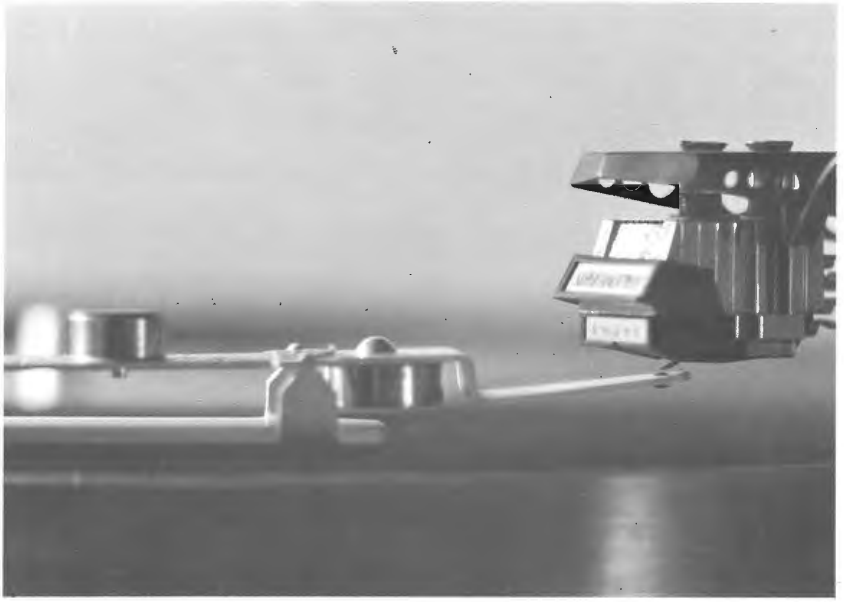


Fig. VI.15 - Bilancia per la determinazione del peso di lettura (della Bib).

VI.6. Bilanciamento laterale

È anche detto equilibramento dinamico. Il problema del bilanciamento laterale nasce in quanto, avendo i bracci una forma curva al fine di ridurre l'errore di pista, il baricentro non è più vicino al punto di intersezione degli assi di rotazione, ma si trova spostato rispetto all'asse di rotazione verticale. Il sistema perciò è squilibrato dinamicamente. La mancanza del bilanciamento laterale causa una rotazione del braccio verso il centro del piatto o verso l'esterno, nel caso in cui il giradischi non sia perfettamente orizzontale.

Nella figura VI.16 a si vede un primo tipo di bilanciamento, ottenuto mediante un contrappeso ausiliario *M'* laterale, alla destra del braccio. Posizionando opportunamente la massa del contrappeso si riconduce il baricentro al punto di intersezione degli assi di rotazione; in questa realizzazione è possibile ottenere il bilanciamento qualunque sia la massa della testina usata.

Una seconda soluzione consiste nel dare al braccio un profilo speciale, ad esempio ad « *S* », come in figura VI.16 b; non è possibile la regolazione, ma la sua forma realizza il bilanciamento automatica-

mente e in modo molto buono, purché le testine usate abbiano un peso compreso entro limiti determinati. In conclusione, con masse ausiliarie o agendo sulla geometria del braccio nella fase di costruzione, è possibile realizzare il bilanciamento laterale e quindi impedire movimenti indesiderati del braccio.

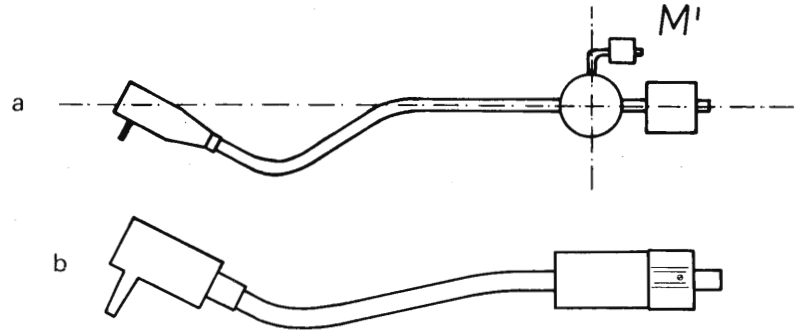


Fig. VI.16 - a) *Bilanciamento laterale ottenuto mediante contrappeso ausiliario* M'; b) *bilanciamento laterale ottenuto mediante profilo speciale del braccio.*

VI.7. Rigidità, massa, inerzia e coefficiente di elasticità

Sono fattori che influenzano in vario modo la qualità di un braccio; è conveniente considerarli assieme in quanto sono legati tra di loro. Il problema della rigidità torsionale si presenta in particolare nei bracci a perno unico visti nel paragrafo VI.1; essi tendono ad oscillare con un movimento di torsione attorno all'asse. Non è quindi possibile usare bracci leggeri, in quanto la leggerezza pregiudica la rigidità. Le oscillazioni torsionali vengono ridotte ricorrendo a forme speciali dei bracci; un esempio è in figura VI.16.

Massa e momento d'inerzia sono legati tra di loro: il momento d'inerzia è tanto maggiore quanto maggiore è la massa e quanto più distante è la massa dall'asse di rotazione (ad esempio, nel caso di una massa puntiforme di valore m, che ruota attorno ad un punto O da cui dista r, il momento d'inerzia è $I = m \cdot r^2$). Il momento d'inerzia del braccio dovrebbe assumere valori bassi, per permettere al braccio stesso di seguire le ondulazioni del disco. Se l'inerzia è notevole, in corrispondenza di un'ondulazione del disco verso l'alto, il braccio tende a mantenere la stessa posizione e perciò può aumentare in modo eccessivo il peso di lettura; viceversa, se lo stilo incontra una ondulazione verso il basso, il peso di lettura diminuisce, con il rischio che la puntina si stacchi dal solco.

Per ridurre l'inerzia è necessario che il braccio sia leggero, e questo implica una piccola massa di tubo del braccio, testina, conchiglia porta-testina e contrappeso; che il contrappeso sia il più vicino possibile all'asse di rotazione; che il braccio sia corto, con la testina vicina all'asse di rotazione.

Il coefficiente di elasticità dello stilo di una testina è un indice della capacità che ha di seguire i movimenti imposti dal solco del disco. Si considera in genere la *complianza* (compliance), grandezza che si misura in cm/dina e indica lo spostamento in centimetri dello stilo prodotto dalla forza di una dina (una dina è circa un milligrammo-peso). Valori inferiori a $4 \cdot 10^{-6}$ cm/dina non sono accettabili; è opportuno comunque non scendere al di sotto del valore $15 \cdot 10^{-6}$ cm/dina. Da notare che esistono un coefficiente di elasticità verticale e un coefficiente di elasticità laterale, in quanto lo stilo ha possibilità di movimento sia verticale che laterale.

L'elasticità dello stilo e la massa del sistema testina-braccio fanno sì che il sistema stesso possa entrare in risonanza e quindi dare una risposta elevata alle basse frequenze; tenuto conto che i valori di complianza sono due, due sono le frequenze di risonanza. Il valore della frequenza di risonanza f_o si trova dalla formula:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{MC}},$$

dove M è la massa effettiva del sistema braccio-testina in grammi e C la complianza in cm/dina.

Tenuto conto che la massa è di alcuni grammi e la complianza è dell'ordine delle decine di 10^{-6} cm/dina, si trova che la frequenza di risonanza è dell'ordine di 10 Hz. Naturalmente un buon braccio deve essere tale da smorzare le oscillazioni, con f_o minore di 15 Hz.

CAPITOLO SETTIMO

I FONORIVELATORI

In questo capitolo si prendono in considerazione i fonorivelatori, cioè quei dispositivi della catena di riproduzione che trasformano le ondulazioni incise sul disco in segnali elettrici: sono dunque trasduttori meccanico-elettrici, che compiono l'operazione inversa del bulino incisore, di cui si è parlato nel capitolo IV. Segue quindi un'analisi dei vari tipi di rivelatori, dai più diffusi e qualitativamente pregevoli a quelli che, pur non essendo di uso comune, presentano tuttavia interesse dal punto di vista del principio di funzionamento o offrono particolari prestazioni. Per permettere un confronto fra i vari fonorivelatori o comunque per un giudizio qualitativo, si è inserito un paragrafo nel quale si sono considerate le caratteristiche principali del fonorivelatore, la loro influenza sul suo comportamento ed i valori ottimali, prescritti dalle norme o comunemente consigliati.

VII.1. Considerazioni generali

I fonorivelatori possono essere considerati sotto diversi aspetti; a chi li utilizza interessano però principalmente sotto due punti di vista: quello del tipo di disco (mono o stereo) sul quale devono lavorare e quello del principio fisico che utilizzano per trasformare le vibrazioni meccaniche in segnale elettrico.

Una prima classificazione può essere fatta perciò suddividendo i fonorivelatori in *mono* e *stereo*. Nel primo tipo la puntina, seguendo il solco, vibra in dipendenza dell'incisione e comunica questo movimento al trasduttore propriamente detto, cioè al dispositivo che trasforma le vibrazioni meccaniche in segnale elettrico. Nel caso invece di disco stereo, il problema si complica, in quanto si tratta di rivelare i due canali, incisi sui due fianchi del solco, come si è visto nel capitolo IV; il movimento vibratorio della puntina deve essere comunicato questa volta a due trasduttori (uno per ogni canale), ciascuno dei quali deve essere sensibile solo ad una componente delle vibrazioni, e precisamente a quella relativa al corrispondente fianco del solco. Diversamente si ha la cosiddetta diafonia, cioè l'interferenza fra i due canali: si ha in sostanza la presenza, sul canale due, di una tensione dipendente dal segnale sul canale uno; i due canali non

sono completamente separati e la rivelazione perde del tutto o in parte le sue caratteristiche stereo. Nei paragrafi successivi vedremo i vari tipi di realizzazione pratica.

Un secondo modo di considerare i fonorivelatori è secondo la grandezza meccanica a cui sono sensibili, nel trasformare le vibrazioni meccaniche in oscillazioni elettriche; infatti, a seconda dei tipi, la tensione elettrica ottenuta può essere proporzionale all'ampiezza dello spostamento della puntina dalla posizione di riposo o alla velocità con cui la puntina si sposta dalla posizione di riposo. Questa distinzione è molto importante per il collegamento del fonorivelatore all'amplificatore, in quanto pone il problema di circuiti correttori. Infatti si è visto che nella fase di incisione i segnali acustici aventi la stessa ampiezza e frequenza diversa vengono trattati in modo diverso e precisamente il bulino incisore registra il segnale con velocità crescente al crescere della frequenza (curva RIAA: vedere cap. IV); ne deriva che l'ampiezza dell'incisione, a parità di intensità di segnale, è costante, indipendentemente dalla frequenza. Ad esempio, se si vogliono incidere due segnali, aventi la stessa ampiezza, ma di frequenza uno 500 Hz e l'altro 5 kHz, i circuiti correttori, mediante variazioni della velocità del bulino, fanno in modo che l'ampiezza di oscillazione della punta incidente sia la stessa.

In fase di rivelazione, nel caso relativo ai fonorivelatori sensibili all'ampiezza di spostamento della puntina, segnali registrati di uguale intensità ma frequenza diversa vengono trasformati in segnali elettrici aventi la stessa ampiezza; perciò non sono necessari circuiti correttori.

Nel caso invece di fonorivelatori sensibili alla velocità di spostamento della puntina è indispensabile la correzione della risposta. Infatti, se due segnali incisi hanno la stessa ampiezza ma frequenza diversa, la punta lettrice, pur compiendo oscillazioni della stessa ampiezza, si muove più velocemente mentre rivela il segnale di frequenza maggiore. Infatti queste frequenze sono state registrate secondo la curva RIAA e perciò con velocità maggiore; di conseguenza le frequenze alte danno una tensione maggiore. È necessario perciò un circuito correttore che attenui i segnali al crescere della frequenza; esso è incorporato nel preamplificatore e la sua curva di risposta (come varia la tensione al variare della frequenza) è simmetrica della curva RIAA. Si verifica però un inconveniente: dato che le frequenze basse sono maggiormente amplificate, sono amplificati anche in misura notevole il rumble e tutti i disturbi a bassa frequenza; possono essere necessari perciò filtri in bassa frequenza che eliminino questi disturbi.

VII.2. Fonorivelatori sensibili all'ampiezza dello spostamento della puntina

Appartengono a questo gruppo diversi tipi di fonorivelatori; essi hanno in comune, come si è visto al paragrafo precedente, il vantaggio di non richiedere circuiti correttori.

a) *Fonorivelatori a cristallo.*

Essi utilizzano l'effetto piezoelettrico, consistente nel fatto che certi cristalli (ad esempio il sale di Rochelle), quando sono soggetti a pressioni o deformazioni meccaniche, manifestano una differenza di potenziale; si ha in sostanza una trasformazione di energia meccanica in energia elettrica (vale anche il fenomeno inverso; nel rivelatore si attua invece il processo di cui si è detto).

Il fonorivelatore monofonico è realizzato in modo molto semplice ed è schematizzato in fig. VII.1 a. La piastrina di cristallo 2 è ancorata al supporto rigido *1*; la puntina 5 è portata dall'asticella 4, il cui compito è di trasmettere le vibrazioni dalla puntina al cristallo, attraverso la forcella 6. La piastrina di cristallo 2 si deforma e di conseguenza si sviluppa fra gli elettrodi 3 una differenza di potenziale che perciò dipende dalle oscillazioni della punta. La tensione di uscita viene inviata all'amplificatore perché la porti al livello necessario alla riproduzione.

In figura VII.1 b è rappresentato il fonorivelatore stereo.

In questo caso le piastrine sono due (2 e 2'), disposte a 45° rispetto alla verticale e perciò all'asse della puntina, però inclinate da parti opposte e quindi perpendicolari fra di loro; sono ancora ancorate al supporto *1* e vibrano in conseguenza delle oscillazioni della puntina 5, che vengono trasmesse alla piastrina mediante la forcella 6.

Nel caso stereo la puntina ha, analogamente al bulino incisore, un movimento che è la risultante di due componenti fra loro perpendicolari, dovute a loro volta alle incisioni sulle pareti destra e sinistra del solco. La particolare disposizione delle piastrine descritta e la loro conformazione sono tali che la tensione ottenuta agli elettrodi di ogni piastrina dipende essenzialmente da un fianco del solco. In questo modo è possibile la separazione dei canali. Da un punto di vista elettrico, il fonorivelatore a cristallo può essere rappresentato dal circuito equivalente di fig. VII.2.

La forza elettromotrice E del generatore equivalente del fonorivelatore è elevata e quindi è alta la sensibilità in rapporto agli altri fonorivelatori che descriveremo; un valore comune è dell'ordine di 20 mV/μm, cioè uno spostamento della puntina di 1 μm (millesimo di millimetro) determina agli elettrodi una tensione di 20 mV. La ca-

pacità C indica la capacità esistente fra gli elettrodi, e dipende dalla superficie e dalla distanza degli elettrodi e dalle caratteristiche dielettriche della piastrina; un valore comune è dell'ordine delle migliaia di pF. La tensione che si ha all'uscita dipende dalla impedenza di carico, cioè dalla impedenza cui è collegata l'uscita del rivelatore;

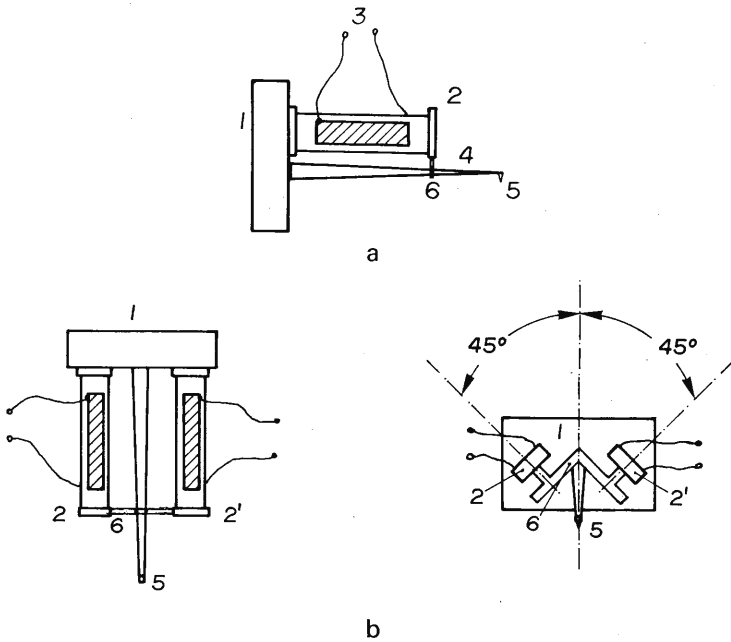


Fig. VII.1 - Fonorivelatori a cristallo: a) *monofonico;* b) *stereofonico.*

essa deve essere, nei rivelatori a cristallo, molto alta cioè dell'ordine di 1-2 MΩ. Infatti, come si vede dalla fig. VII.2, la tensione di uscita V non coincide con la forza elettromotrice E, in quanto vi è una caduta di tensione sul condensatore C; questa caduta dipende dal valore della capacità del condensatore e dalla frequenza: la reattanza del condensatore è infatti $X = 1/2\ \pi fC$. Si ha in sostanza un filtro passa alto: alle basse frequenze la reattanza del condensatore è elevata e quindi la tensione di uscita è bassa; alle alte frequenze il condensatore si comporta come un cortocircuito, la caduta su di esso è trascurabile e quindi si può ritenere $V = E$.

Per evitare questa riduzione di tensione d'uscita alle frequenze basse, i fonorivelatori a cristallo devono perciò essere collegati su un'impedenza elevata; infatti se l'impedenza di carico è molto maggiore della reattanza del condensatore, si può ritenere che la caduta di tensione sul condensatore sia trascurabile e che perciò tutta la forza elettromotrice E sia disponibile all'uscita. Naturalmente a frequenze molto basse la condizione non sarà più verificata: al limite,

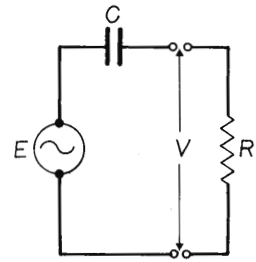


Fig. VII.2 - Circuito equivalente del fonorivelatore a cristallo.

a frequenza zero, la reattanza del condensatore è infinita, e perciò la tensione di uscita è nulla, anche se $R = 10$ MΩ. Si considera come limite inferiore della banda riprodotta quella frequenza a cui la reattanza del condensatore è uguale alla resistenza di carico; per tale valore di frequenza, $V = E/\sqrt{2} = E \cdot 0{,}707$.

Il fonorivelatore a cristallo può essere considerato un rivelatore di qualità medie. Tra i principali aspetti positivi sono: il basso costo; i buoni valori di sensibilità che si sono visti (20 mV/μm); la sensibilità all'ampiezza, quindi il fatto di non richiedere circuiti correttori; infine l'insensibilità ai disturbi magnetici, dovuta al fatto che il suo funzionamento non si basa su fenomeni di natura elettromagnetica, come i rivelatori che vedremo. Per quanto riguarda gli aspetti negativi: la curva di risposta, cioè l'andamento della tensione di uscita al variare della frequenza, non è ideale, presentando delle irregolarità; la separazione dei canali è inferiore a quella che si ha in altri modelli.

b) *Fonorivelatori ceramici.*

Sono simili ai fonorivelatori a cristallo, solo che la piastrina è di materiale ceramico, generalmente a base di titanato di bario o titanato-zirconato di piombo. Il loro funzionamento si basa sull'effetto

di elettrostrizione, che è analogo a quello piezoelettrico; pertanto per questo tipo di fonorivelatori vale quanto già detto per i rivelatori a cristallo. Da questi ultimi si differenziano per una sensibilità inferiore.

c) *Altri tipi di fonorivelatori sensibili all'ampiezza.*

Si tratta di fonorivelatori che hanno una diffusione notevolmente inferiore ai tipi piezoelettrici e magnetici.

1) *Fonorivelatori a semiconduttore.*

La loro struttura è molto simile al fonorivelatore piezoelettrico; la differenza consiste nel fatto che come trasduttore si usa materiale semiconduttore anziché piezoelettrico. Sotto l'azione delle oscillazioni della puntina, le piastrine si deformano e varia la resistenza elettrica del semiconduttore; se esso è inserito in un circuito chiuso, alimentato da un generatore di tensione, la corrente nel circuito varia in dipendenza della resistenza del semiconduttore e perciò dell'oscillazione registrata: si ha in sostanza una modulazione di corrente. Queste variazioni sono poi amplificate e inviate all'altoparlante.

La diffusione di questo tipo di fonorivelatore è limitata soprattutto dal fatto di richiedere un generatore di tensione esterno (due, uno per ogni piastrina nel caso stereo); inoltre presentano leggere imperfezioni della curva di risposta che, però, rispetto ai fonorivelatori del tipo precedente, non ha limiti di estensione alle basse frequenze, almeno in teoria.

2) *Fonorivelatori fotoelettrici.*

Si basano sul fenomeno della fotoelettricità: un foto-transistore, colpito da un raggio di luce, trasforma l'energia luminosa in energia elettrica. La puntina è solidale con uno schermo con fenditure, opportunamente frapposto tra una lampada in miniatura e i foto-transistori. Quando la puntina, seguendo il solco, vibra, le sue oscillazioni si trasformano in movimenti dello schermo e quindi in variazioni dell'intensità del fascio di luce che colpisce il foto-transistore; ne deriva che ai suoi capi è presente una tensione variabile in funzione delle vibrazioni della puntina e perciò del segnale registrato sul disco.

L'uso del foto-transistore consente una buona sensibilità; un altro aspetto positivo è la banda passante estesa. La diffusione è limitata dal costo, dal fatto che richiede un generatore esterno e dalla vita limitata della lampada; è da tenere in conto inoltre la complessità del sistema nel caso stereo.

3) *Fonorivelatori a condensatore.*

In questo tipo di fonorivelatori il braccio porta-puntina è solidale con l'armatura mobile di un condensatore, la cui armatura fissa è sostenuta da un supporto rigido. In sostanza le vibrazioni della puntina causano variazioni della posizione reciproca delle armature e quindi della capacità del condensatore; infatti la capacità dipende dalla estensione delle superfici affacciate e dalla distanza delle armature. Il condensatore fa parte del circuito risonante di un generatore di segnali in alta frequenza e quindi le variazioni di capacità causano variazioni di frequenza della tensione di uscita del generatore; si ha cioè una tensione modulata in frequenza dal segnale audio. Un demodulatore consente di estrarre dall'onda modulata il segnale in bassa frequenza.

Malgrado la grandissima sensibilità, sono poco diffusi a causa della complessità del sistema e del costo.

VII.3. Fonorivelatori sensibili alla velocità di spostamento della puntina

Appartengono a questo tipo i fonorivelatori a induzione magnetica. Essi manifestano ai loro capi una tensione proporzionale al rapporto fra variazione di flusso magnetico e intervallo di tempo in cui si ha la variazione stessa; quindi, a parità di variazione di flusso, maggiore è la velocità con cui si muove la puntina, minore è l'intervallo di tempo e quindi più alta è la tensione d'uscita. Si ha così una tensione d'uscita che dipende dalla velocità della puntina. Sono perciò necessari i circuiti correttori, come si è visto al paragrafo VII.1.

Malgrado questa complicazione, le loro caratteristiche soddisfano le esigenze dell'alta fedeltà, per cui sono preferiti nelle apparecchiature di qualità. Esaminiamo i tipi principali.

1) *Fonorivelatori a riluttanza variabile.*

Per spiegare il funzionamento di questo tipo di fonorivelatore, occorre premettere qualche considerazione sui circuiti magnetici. Un magnete crea nello spazio circostante un campo magnetico, le cui linee vanno dal polo Nord al polo Sud. Se fra i due poli interponiamo una successione di materiali ferro-magnetici, il complesso può essere considerato un circuito magnetico, cioè un canale attraverso cui è concatenato un certo flusso. Il valore del flusso, misurato in Wb (weber) relativo a quel circuito, dipende dal magnete permanente, ma anche dalle caratteristiche geometriche e magnetiche del mate-

riale che costituisce il circuito (lunghezza, sezione, permeabilità magnetica); la opposizione del circuito ad essere attraversato da un flusso magnetico si dice *riluttanza.* Essa è direttamente proporzionale alla lunghezza e inversamente proporzionale a sezione e permeabilità del materiale. Consideriamo la fig. VII.3, che si riferisce ad un fonorivelatore monofonico.

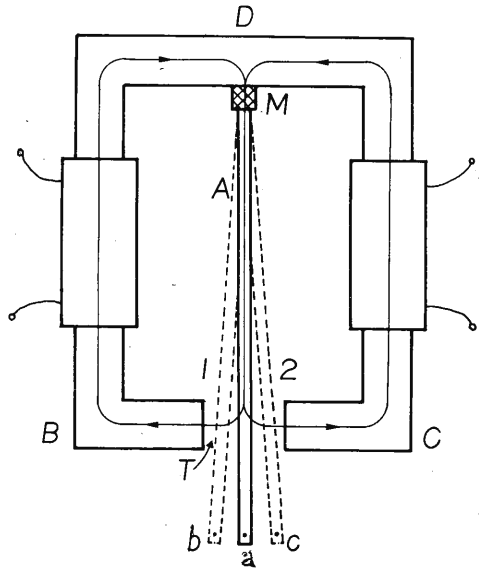


Fig. VII.3 - Fonorivelatore a riluttanza variabile.

In essa si vedono: il magnete permanente *M*; l'asta porta-puntina *A*; il traferro, cioè l'interruzione del circuito magnetico, *T*; infine i due nuclei *B* e *C* e il giogo *D* che chiudono il circuito magnetico. Per quanto riguarda il circuito magnetico *1*, il flusso creato dal magnete *M*, rappresentato dalla linea a tratto sottile, passa attraverso l'asta *A*, il traferro *T*, il nucleo *B* e si chiude sul magnete attraverso il giogo *D*.

Il circuito magnetico 2 sarà interessato da un identico flusso, data la simmetria della struttura.

Supponiamo che l'asta si sposti dalla posizione centrale *a* alla posizione *b* di fig. VII.3. Ora la situazione non è più simmetrica: i traferri sono di dimensioni diverse. Il circuito magnetico *1*, avente un traferro minore, ha una minore riluttanza; infatti il traferro dà un

contributo determinante alla riluttanza del circuito magnetico, essendo la permeabilità magnetica relativa dell'aria uguale a uno. Una riluttanza diversa dei due circuiti causa, a sua volta, una diversa distribuzione dei flussi rispetto al caso precedente; il flusso relativo al circuito *1* aumenta (la riluttanza infatti è diminuita) e quello relativo al circuito 2 diminuisce (la riluttanza è aumentata).

Il funzionamento del fonorivelatore a riluttanza variabile si basa sul fenomeno spiegato. Se l'asta *A* porta la puntina, le vibrazioni della puntina causano oscillazioni dell'asta che passa dalla posizione *a* alla posizione *b* e alla sua simmetrica *c*; di conseguenza la riluttanza dei circuiti magnetici varia. Il flusso perciò non è costante, ma anch'esso varia in dipendenza delle oscillazioni della puntina. Se perciò si avvolgono due bobine attorno ai nuclei *B* e *C*, in esse nascono delle forze elettromotrici che dipendono dal segnale audio registrato. Le due bobine sono opportunamente collegate in serie, in modo che le forze elettromotrici si sommino.

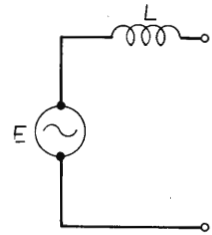


Fig. VII.4 - Circuito equivalente del fonorivelatore a riluttanza variabile.

Dal punto di vista circuitale, questo fonorivelatore può essere rappresentato da un generatore di tensione *E* in serie a una induttanza *L*, la cui reattanza è di solito di alcune migliaia di ohm a 1.000 Hz (vedi fig. VII.4).

Questo tipo di fonorivelatore ha una sensibilità discreta in confronto agli altri tipi magnetici, ma bassa nei confronti dei precedenti tipi piezoelettrici; ad esempio, alla frequenza di 1 kHz, alla velocità di 5 cm/s, la tensione ottenuta è dell'ordine di appena qualche millivolt. Un secondo aspetto negativo è nella non corrispondenza proporzionale fra variazioni di flusso e vibrazioni della puntina: la relazione è infatti complessa, come si è visto, e la struttura non permette tale proporzionalità; di conseguenza la tensione di uscita non è rigorosamente proporzionale alle oscillazioni della puntina. Infine, come si è visto, richiede circuiti correttori. In compenso la banda è uniforme e nel caso stereo è bassa la diafonia.

2) *Fonorivelatori a bobina mobile.*

Si basano sul fatto che, se una bobina si muove in un campo magnetico, nasce ai suoi capi una forza elettromotrice indotta direttamente proporzionale alla variazione di flusso e inversamente proporzionale all'intervallo di tempo in cui tale variazione avviene.

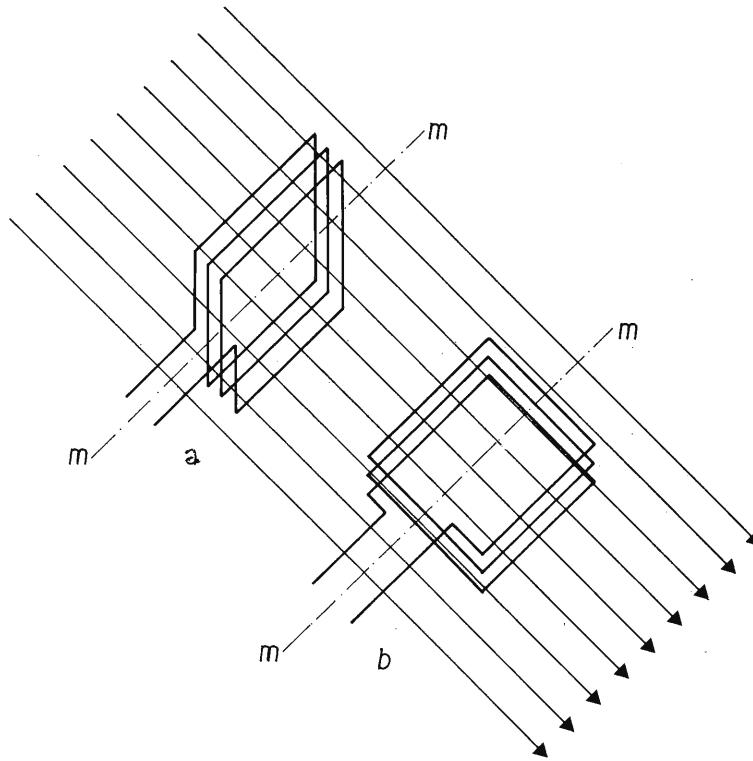


Fig. VII.5 - Bobina che si muove in un campo magnetico.

Semplificando il problema, in fig. VII.5 si vede come la bobina che ruota attorno all'asse *m-m* può trovarsi nella posizione *a,* in cui è massimo il flusso concatenato, cioè il flusso che la investe; oppure nella posizione *b,* in cui il flusso concatenato è nullo; nelle posizioni intermedie il flusso concatenato assume valori intermedi fra i valori suddetti.

Se quindi la bobina ruota, varia il flusso ad essa concatenato e quindi nasce ai suoi capi una forza elettromotrice. Il principio vale in generale, anche se il movimento non è semplicemente di rotazione.

Il fonorivelatore è schematizzato in fig. VII.6. Il magnete permanente *M* crea un flusso che, attraverso il circuito magnetico *CM*, si concatena con la bobina *b*. Questa è solidale con un'asta che porta la puntina *P* e può oscillare attorno al punto *C*. Le vibrazioni della puntina che segue il solco si trasformano in movimenti della bobina; varia perciò il flusso concatenato con essa e nasce una forza elettromotrice indotta ai suoi capi.

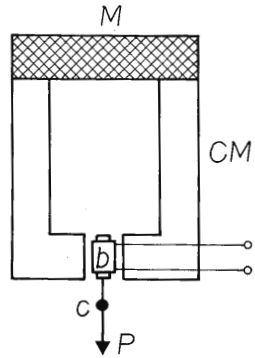


Fig. VII.6 - Fonorivelatore a bobina mobile.

La bobina è piccola e leggera, quindi l'organo vibrante può seguire l'incisione con altissima fedeltà: la banda passante è molto estesa. Gli svantaggi consistono nella delicatezza e nel fatto di richiedere un trasformatore elevatore. Infatti la tensione che si ottiene, senza trasformatore elevatore, è molto piccola: alla velocità di 1 cm/s, a 1 kHz, la forza elettromotrice è dell'ordine delle decine di μV. Inoltre l'impedenza è di appena alcune decine di ohm. È perciò indispensabile l'uso di un trasformatore elevatore di tensione e di impedenza, inserito tra bobina e preamplificatore. Esso può essere addirittura incorporato nella testina: si ha però l'inconveniente dell'aumento della massa della testina stessa. Oppure può essere inserito vicino al preamplificatore, però si pongono problemi di efficace schermatura; infatti i cavetti che collegano bobina con trasformatore, se non sono efficacemente schermati, raccolgono disturbi di natura elettromagnetica di varia origine (esempio: rete di distribuzione dell'energia elettrica; motori), la cui influenza può essere notevole, dato il

basso valore della forza elettromotrice ai capi del rivelatore. In figura VII.7 è riportato un rivelatore stereo a bobina mobile.

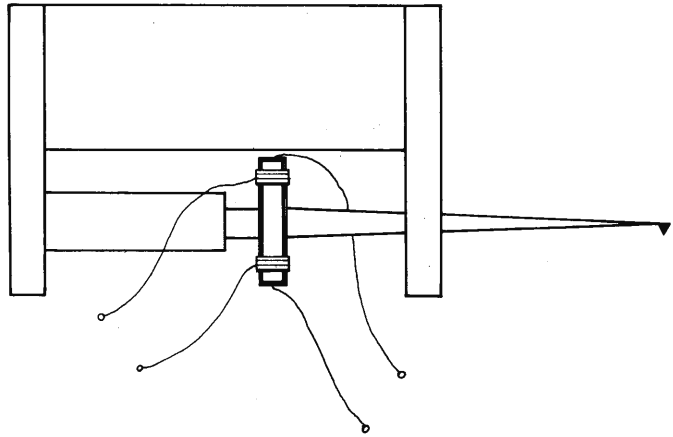


Fig. VII.7 - Fonorivelatore a bobina mobile stereofonico.

3) *Fonorivelatori a magnete mobile (magnetodinamici).*

Un esempio semplificato è riportato in fig. VII.8, che si riferisce ad un rivelatore monofonico. Il braccio, alla cui estremità è la puntina *P*, porta un piccolo magnete permanente *M* all'altra estremità; le vibrazioni della puntina determinano oscillazioni del magnetino attorno al punto *O*; queste, a loro volta, causano variazioni di flusso attraverso il circuito magnetico *CM*. Infatti si vede dalla figura VII.8 come il flusso attraverso il circuito magnetico vari. In *a*, data la simmetria, il flusso concatenato con le bobine *B* è nullo. In *b* è rappresentato il caso di spostamento verso sinistra; è disegnata una sola linea del campo, la quale dimostra l'esistenza di un flusso attraverso il circuito magnetico diretto in senso orario. In *c* è la situazione opposta. Si può di conseguenza dire che il flusso attraverso il circuito magnetico varia in dipendenza delle oscillazioni del magnetino; quindi nascono due forze elettromotrici ai capi delle bobine che, se si collegano opportunamente le due bobine, si sommano.

L'impedenza è dell'ordine delle decine di migliaia di ohm, quindi non occorre trasformatore elevatore. La sensibilità è in relazione alla banda che si vuole ottenere; infatti, perché la banda sia larga, il magnetino deve essere leggero, in modo che la puntina possa seguire

qualsiasi incisione del solco; ma se il magnete è piccolo, è anche piccolo il flusso da esso creato e quindi è bassa la tensione d'uscita.

Per avere un termine di riferimento, si può dire che, a 1.000 Hz, alla velocità di 5 cm/s, si hanno tensioni dell'ordine dei millivolt.

Date la bassa distorsione e la larga banda, i rivelatori magnetodinamici possono essere considerati dei rivelatori ad altissima fedeltà. Il loro circuito equivalente è analogo a quello di fig. VII.4.

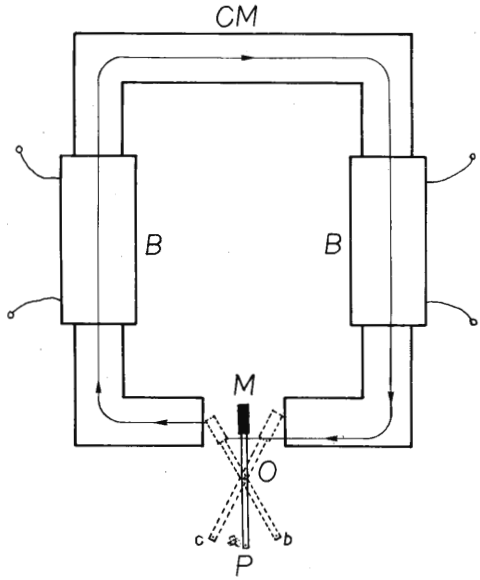


Fig. VII.8 - Principio di funzionamento del rivelatore a magnete mobile.

4) *Fonorivelatori a magnete indotto.*

Due esempi semplificati sono riportati nella figura VII.9. Si nota che la struttura è molto simile a quella del caso precedente; la differenza consiste nel fatto che si ha un magnete fisso *M* nel cui campo si trova una piccola barretta di ferro dolce solidale all'asta porta--puntina. La barretta viene magnetizzata per induzione e perciò il sistema è detto a magnete indotto; col suo movimento essa determina le variazioni di flusso concatenato con le bobine, come nel caso precedente.

Il vantaggio di questo dispositivo consiste nel fatto che, essendo il magnete fisso, può essere di dimensioni tali da garantire un forte

campo; nello stesso tempo la barretta in ferro dolce può essere sufficientemente piccola e leggera, in modo che la puntina segua le variazioni più rapide dell'incisione.

Si hanno quindi sia una buona sensibilità sia una banda larga.

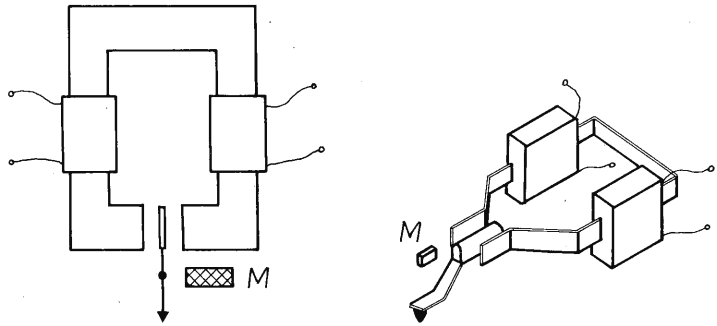


Fig. VII.9 - Fonorivelatori a magnete indotto.

Inconvenienti di questo sistema sono l'esigenza, come per tutti i rivelatori magnetici, di un circuito correttore e la presenza di una leggera distorsione dovuta al fatto che la struttura non è così semplice e simmetrica come nel caso di fonorivelatore a magnete mobile.

VII.4. La puntina

La puntina o stilo è di diamante o zaffiro; si preferisce di diamante a causa della più lunga durata.

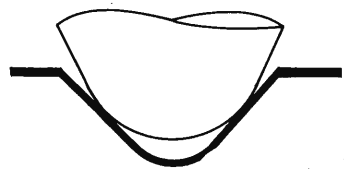


Fig. VII.10 - Il contatto fra puntina e solco.

In fig. VII.10 si vede come il contatto dello stilo con il solco avvenga nella parte centrale delle pareti del solco; solco e puntina sono dimensionati in modo da realizzare questo scopo. Un contatto troppo superficiale (puntina di più ampie dimensioni) presenta il ri-

schio di salto di solchi, oltre ad essere comunque causa di distorsioni. Se invece la puntina è troppo sottile, il contatto col solco avviene nel fondo dello stesso, zona nella quale l'incisione è di qualità inferiore. Il contatto ottimale è perciò nella zona centrale.

La forma della puntina può essere:

a) radiale o *sferica*. Il raggio è $r = 15\ \mu m \pm 3\ \mu m$ (cioè varia da 12 a 18 μm, a seconda dei tipi). Ha l'inconveniente di non garantire un buon contatto quando le dimensioni del solco diventano piccole;

b) ellittica o *biradiale*: garantisce un miglior contatto col solco, indipendentemente dalle dimensioni dello stesso; come dice il termine « biradiale », ha due raggi di curvatura: è maggiore il raggio nella sezione perpendicolare al disco e trasversale al solco. I valori dei due raggi possono essere, ad esempio, di 15 e 18 μm;

c) shibata: è del tipo ellittico; è stata studiata in modo da avere una buona risposta anche alle alte frequenze (frequenze modulate fino ad alcune decine di kHz: vedi quadrafonia).

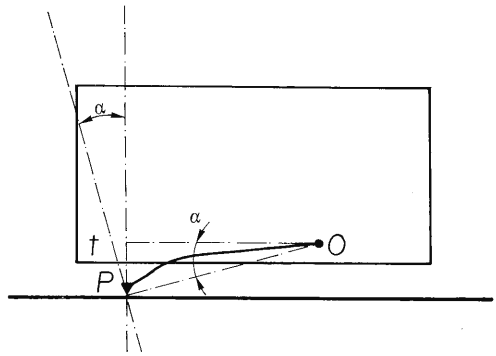


Fig. VII.11 - Lo stilo e l'angolo di tracciatura α.

Per quanto riguarda la durata dello stilo, è importante che sia ottimale la scelta del peso, cioè della forza con la quale la puntina preme sul solco. Se la pressione è eccessiva, si ha infatti un maggior consumo dello stilo ed anche del disco; d'altra parte, se il carico è troppo basso, c'è il rischio che la puntina salti da un solco all'altro o, comunque, come si è visto per un contatto troppo superficiale, la distorsione può essere elevata.

Un altro parametro caratteristico dello stilo, o più precisamente del modo con cui lo stilo lavora, è l'*angolo di tracciatura* o *incidenza verticale (vertical tracking angle).* In fig. VII.11 è indicato con α.

La puntina *P* è sostenuta da un braccio porta-puntina *OP*, fisso ad un punto *O* della testina (fig. VII.11). I movimenti della puntina avvengono perciò lungo un arco di cerchio di centro *O* e, per piccoli spostamenti, si può ritenere che il movimento di *P* avvenga lungo la tangente *t* in *P* al cerchio di centro *O*. L'angolo α è l'angolo che detta tangente forma con la perpendicolare al disco in *P*; si nota, dalla figura, che detto angolo è uguale a quello formato dal braccio *OP* con la superficie del disco. Tale angolo deve coincidere con l'angolo con cui il bulino ha tracciato il solco; diversamente si ha distorsione. Il valore normalizzato è $\alpha = 15° \pm 5°$.

VII.5. Caratteristiche principali dei fonorivelatori

Per concludere, riuniamo in questo paragrafo i principali parametri che caratterizzano i fonorivelatori; il loro confronto può infatti permettere di esprimere un giudizio qualitativo sui vari tipi in commercio.

1) *Banda passante.*

Se un disco porta incisi segnali di uguale intensità ma di frequenza diversa, il rivelatore dovrebbe dare una tensione di uscita costante al variare della frequenza; tale situazione ideale non è mai perfettamente verificata in pratica. Da un lato i fonorivelatori non sono in grado, come si è visto, di riprodurre frequenze molto alte o molto basse; dall'altro lato si verificano, entro la banda passante, dei picchi causati da risonanze. Alle frequenze più alte spesso si ha un picco dovuto alla risonanza del braccetto porta-puntina; alle basse frequenze la risonanza è dovuta alla complianza e alla massa del braccio, come si è visto al paragrafo VI.7.

Un dato di riferimento può essere questo: la tensione di uscita deve essere contenuta entro una fascia di $\pm$ 2,5 dB nell'intervallo di frequenza 20 Hz-20 kHz.

2) *Scarto di risposta fra i canali.*

Si intende il rapporto, in dB, fra le risposte dei due canali, nel caso di segnali audio incisi di uguale ampiezza.

Deve essere inferiore a 1 dB, in valore assoluto.

3) *L'attenuazione di diafonia.*

Indica la separazione fra i due canali. Il suo valore è, in dB, il rapporto fra le tensioni sui due canali all'uscita del fonorivelatore, quando è inciso solo il fianco del disco che corrisponde ad un canale.

Deve essere, secondo le norme DIN, superiore a 20 dB ad 1 kHz. Di solito è superiore a 30 dB. Il valore dell'attenuazione del canale destro rispetto al sinistro e quello dell'attenuazione del canale sinistro rispetto al destro non devono differire di più di 3 dB.

4) *Tasso di intermodulazione.*

È un indice della distorsione di non linearità: è infatti l'interazione fra due segnali causata dalla non linearità del fonorivelatore. Se sono contemporaneamente presenti un segnale a frequenza f_1 e un segnale a frequenza f_2, all'uscita del fonorivelatore, oltre a questi due segnali si hanno tensioni a frequenza $f_2 - f_1$, $f_2 + f_1$, $f_2 - 2f_1$, $f_2 + 2f_1$ ecc., che si dicono prodotti di intermodulazione; è come se la tensione di frequenza f_2 fosse modulata dalla tensione di frequenza f_1 e dalle sue armoniche. In fase di misura, i prodotti di intermodulazione vengono filtrati ed è misurato il valore efficace della loro somma; il rapporto fra questo valore ed il valore efficace della tensione di frequenza f_2 è la distorsione di intermodulazione.

Secondo le norme DIN: con $f_1 = 300$ Hz, $f_2 = 3.000$ Hz, e rapporto delle ampiezze dei segnali uguale a quattro, il tasso di intermodulazione deve essere inferiore all'1 %.

Sul suo valore influisce molto il peso di lettura: si considera peso di lettura ottimale quello che rende minima la distorsione di intermodulazione.

5) *La complianza (detta anche cedevolezza, compliance, ammettenza meccanica).*

Se ne è già discusso al paragrafo VI.7. Essa indica in sostanza di quanto si sposta l'asta che porta lo stilo in seguito all'applicazione di una forza; si misura in cm/dina. La complianza, in primo luogo, determina, come si è visto, assieme alla massa del braccio, la risonanza alle basse frequenze. In secondo luogo indica la capacità della puntina di seguire le ondulazioni del solco; ad alti valori di complianza corrispondono ottime capacità di lettura anche con peso di lettura basso e questo è un grosso vantaggio, in quanto peso di lettura basso significa maggiore durata del disco.

La complianza deve essere maggiore di $15 \cdot 10^{-6}$ cm/dina; in fonorivelatori ottimi può arrivare a $40 \cdot 10^{-6}$ cm/dina.

6) *Angolo di tracking verticale.*

Se ne è già parlato al paragrafo VII.4. Si è visto che deve essere uguale a $15° \pm 5°$.

7) *Sensibilità.*

Nei fonorivelatori sensibili all'ampiezza dell'oscillazione, si indica con sensibilità la tensione di uscita riferita allo spostamento della puntina dalla posizione di riposo; si misura perciò in mV/μm. Può essere, ad esempio, 20 mV/μm.

Nei fonorivelatori sensibili alla velocità con cui la puntina si sposta dalla posizione di riposo, la sensibilità è la tensione prodotta alla frequenza di 1 kHz, riferita alla velocità di lettura; dato che la tensione è misurata in mV e la velocità di lettura in cm/s, la sensibilità è misurata in mV al cm/s. Valori comuni sono dell'ordine dell'unità di mV al cm/s.

CAPITOLO OTTAVO

ALTOPARLANTI, CASSE ACUSTICHE E CUFFIE

In questo capitolo si considerano i trasduttori elettroacustici, cioè quei dispositivi che trasformano i segnali elettrici in onde sonore.

In primo luogo si esaminano i principali tipi di altoparlanti, studiandone il funzionamento, le caratteristiche fondamentali e i limiti di impiego. Proprio l'esigenza di superare grossi limiti di funzionamento degli altoparlanti ha causato l'introduzione delle casse acustiche, che verranno esaminate dai tipi più semplici ai tipi ad asservimento (casse attive).

È sembrato opportuno infine completare il capitolo con un paragrafo sulla cuffia, un trasduttore elettromeccanico che non offre le stesse prestazioni di un diffusore, il cui uso tuttavia è spesso imposto da esigenze particolari.

VIII.1. Altoparlanti

L'altoparlante, come si è detto, ha lo scopo di trasformare il segnale elettrico in onda sonora. Nell'esaminare gli altoparlanti, un primo elemento da considerare è dunque la capacità di irradiare energia acustica; è da notare inoltre che l'energia acustica non è in genere irradiata uniformemente nello spazio circostante, ma viene concentrata in un determinato angolo solido e questa caratteristica prende il nome di direzionalità o direttività dell'altoparlante.

Un secondo elemento importante è la risposta in frequenza: il trasduttore elettroacustico deve essere in grado di riprodurre uniformemente tutte le frequenze acustiche.

Premesse queste considerazioni di massima sugli altoparlanti, si esaminano i tipi principali in commercio.

1) *Altoparlanti a bobina mobile.*

a) Principio di funzionamento.

Il loro principio di funzionamento è identico a quello dei motori: un conduttore percorso da corrente elettrica e immerso in un campo magnetico è soggetto ad una forza perpendicolare alle linee del campo e al conduttore stesso. Esso tende perciò a muoversi nella dire-

zione della forza stessa. La realizzazione pratica è illustrata nella figura VIII.1.

La bobina mobile 1, ancorata alla membrana dell'altoparlante, si trova immersa nel campo magnetico creato dal magnete permanente 2; quando è percorsa da corrente, è soggetta ad una forza che tende a traslarla verso sinistra o verso destra, a seconda del verso

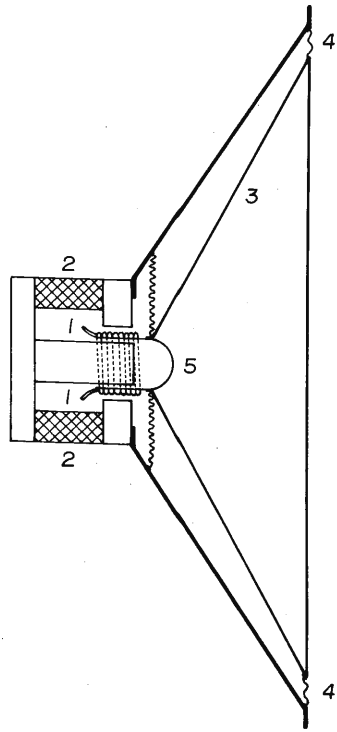


Fig. VIII.1 - Altoparlante a bobina mobile.

della corrente: con la corrente alternata la bobina oscilla e trasmette le vibrazioni alla membrana 3; questa è fissata alla periferia dell'intelaiatura mediante delle sospensioni elastiche 4 e al centro mediante il cosiddetto spider (centratore) 5: lo scopo di questo montaggio è di consentire solo movimenti della membrana in direzione dell'asse dell'altoparlante e non laterali, oltre che di sostenere la membrana e di centrare la bobina tra le espansioni polari del ma-

gnete. Le vibrazioni della membrana sono trasmesse all'aria e si hanno quindi nell'ambiente circostante le compressioni e rarefazioni che costituiscono l'onda sonora.

b) Caratteristiche costruttive.

È importante vedere come sono realizzati gli elementi che costituiscono l'altoparlante, in quanto da essi dipendono le caratteristiche dello stesso.

Il magnete deve creare nell'intraferro un campo magnetico molto intenso: infatti la forza che agisce su ogni conduttore è direttamente proporzionale all'induzione magnetica (e cioè all'intensità del campo), oltre che alla lunghezza del conduttore e all'intensità della corrente che lo percorre. Il magnete è spesso una lega a base di titanio, cobalto, nickel, alluminio, con espansioni polari in ferro dolce, in modo da garantire una bassa riluttanza del circuito magnetico.

Per quanto riguarda le caratteristiche delle bobine, interessano soprattutto rigidità, leggerezza e dimensioni. La rigidità consente una efficace trasmissione del movimento alla membrana. La leggerezza è importante particolarmente alle alte frequenze audio, in quanto più leggera è la bobina più è in grado di rispondere a correnti ad alta frequenza; per diminuire il peso si ricorre spesso a conduttori di alluminio anziché di rame, anche se questo comporta una maggiore resistenza e quindi maggiori perdite per effetto Joule. Infine, per quanto riguarda la lunghezza, la bobina dovrebbe essere di dimensioni tali da rimanere sempre entro il traferro, pur oscillando. Se infatti esce parzialmente dal traferro, un numero inferiore di spire risulta soggetta al campo uniforme in quegli istanti e quindi una forza minore agisce su di essa; la forza perciò non dipenderebbe solo dall'intensità di corrente che percorre la bobina, ma anche dalla sua posizione: tutto questo è causa di distorsione. Il problema non si pone alle alte frequenze, in quanto in questo caso le oscillazioni sono di ampiezza ridotta e quindi la bobina può essere della stessa lunghezza del traferro, come si vede in figura VIII.2 a, in modo da avere la massima efficienza. Nel caso delle basse frequenze, si adotta la soluzione di figura VIII.2 c; anche per oscillazioni di grande ampiezza, se la bobina è sufficientemente più lunga del traferro, risulta sotto la azione del campo sempre lo stesso numero di spire; la forza motrice è perciò indipendente dalla posizione. Questo avviene però a scapito del rendimento: parte delle spire dà poco contributo alla forza motrice. Infine, nel caso delle frequenze medie, si può usare la soluzione di figura VIII.2 b; se le spire sono poche, rimangono sempre entro il traferro anche se le oscillazioni sono ampie, entro naturalmente certi limiti; l'efficienza questa volta è bassa a causa del pic-

colo numero di spire in rapporto alle dimensioni del traferro. Si vede già da questo come le caratteristiche degli altoparlanti debbano essere diverse alle frequenze basse, medie e alte e come quindi sia impossibile una soluzione che consenta, con un unico altoparlante, la risposta a buoni livelli su tutta la banda audio.

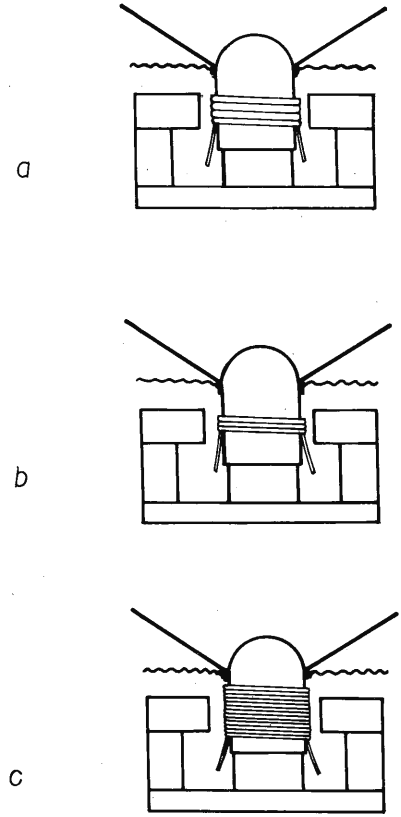


Fig. VIII.2 - Le bobine degli altoparlanti per alte (a), *medie* (b) *e basse* (c) *frequenze.*

I medesimi problemi si incontrano nella realizzazione della membrana. Si è già vista la sua funzione di vibrare e di conseguenza di determinare le compressioni e rarefazioni dell'aria circostante, che costituiscono le onde sonore; è in sostanza un pistone la cui caratteristica fondamentale deve essere quella di non deformarsi,

cioè deve essere rigido. Alle basse frequenze le membrane sono di grandi dimensioni; è relativamente grande anche la massa, date le dimensioni e l'esigenza di rigidità. Un aumento di massa, d'altra parte, entro certi limiti, non pregiudica la capacità di vibrazione del sistema alle basse frequenze, alle quali le oscillazioni sono ampie; inoltre consente di abbassare la frequenza di risonanza meccanica del complesso membrana-bobina-sospensioni elastiche, e quindi di estendere l'utilizzazione dell'altoparlante alle frequenze più basse della banda audio. Le stesse membrane non possono essere usate alle alte frequenze, poiché la massa relativamente alta non consente di rispondere alle oscillazioni più rapide e di minore ampiezza; inoltre tendono a vibrare a zone, cioè non tutta la superficie della membrana si comporta allo stesso modo, con una notevole diminuzione di rendimento in corrispondenza di alcuni valori di frequenza. Infatti la vibrazione, trasmessa dalla bobina alla circonferenza più interna della membrana, viaggia lungo la membrana stessa, è riflessa ai bordi e ritorna verso il centro; oscillazione incidente e riflessa si trovano così contemporaneamente presenti e possono produrre effetti opposti, per determinati valori di frequenza e in corrispondenza di certe zone della membrana; ciò accade in particolare alle alte frequenze, per le quali le dimensioni della membrana sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda. Tutti questi motivi fanno sì che le membrane degli altoparlanti per le alte frequenze abbiano caratteristiche diverse: sono leggere, di piccole dimensioni, in genere di forma a calotta.

Un esempio è in figura VIII.3. Vi si vede la membrana a forma emisferica 1, sostenuta dalle sospensioni elastiche 3, che fa corpo

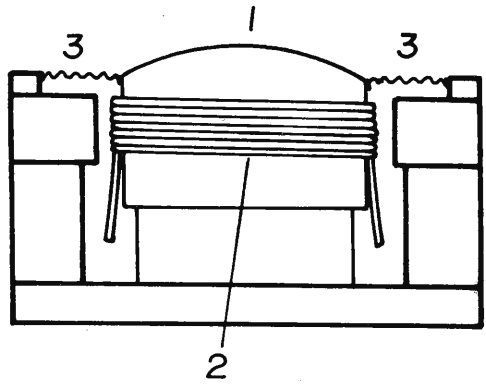


Fig. VIII.3 - Altoparlante a calotta per alte frequenze.

unico con la bobina 2. Questo tipo di altoparlante è caratterizzato da leggerezza, date le piccole dimensioni, e da grande rigidità, data la forma a calotta; infine l'energia è irradiata abbastanza uniformemente nello spazio circostante: l'altoparlante non manifesta cioè accentuati effetti direttivi.

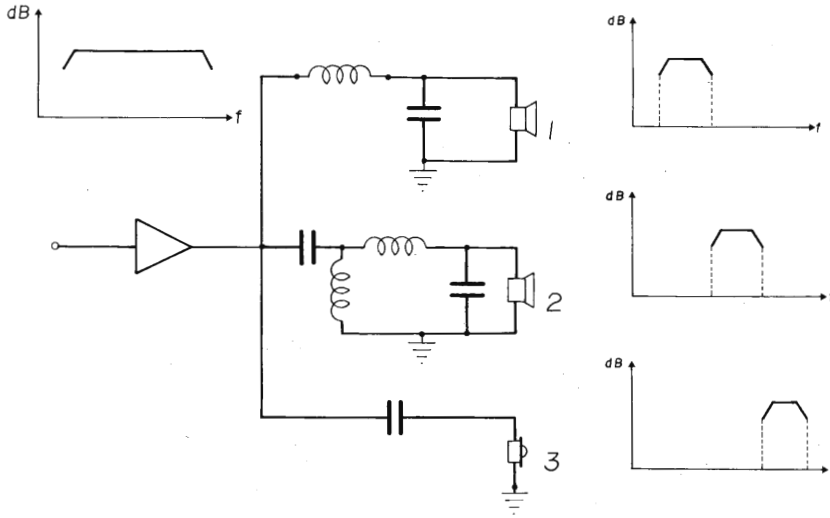


Fig. VIII.4 - Esempio di suddivisione delle frequenze per un sistema a tre altoparlanti.

In figura VIII.4 si vedono tre tipi di altoparlanti, ognuno dei quali è realizzato in modo da servire un campo di frequenze determinato: il *woofer* 1, di dimensioni maggiori, è progettato per riprodurre le basse frequenze; il mid-range 2, detto anche *squawker,* di dimensioni medie, è adatto alle medie frequenze; infine il più piccolo, il *tweeter* 3, ha lo scopo di riprodurre la parte più alta dello spettro audio. Il sistema a più altoparlanti, quantunque più costoso, consente di coprire in modo molto efficace lo spettro audio.

c) Caratteristiche elettriche di un altoparlante.

Il circuito equivalente è rappresentato in figura VIII.5: in *a)* la situazione a bobina bloccata; in *b)* il caso di altoparlante funzionante in condizioni normali. Nel primo caso, nell'ipotesi che le oscillazioni meccaniche siano impedite, la bobina equivale a una resi-

stenza R, con la quale si tiene conto delle perdite per effetto Joule nel filo, in serie a una induttanza L; una capacità C è in parallelo alla serie di R e L. Quando la bobina è libera di oscillare, si ha passaggio di energia dal sistema elettrico all'ambiente circostante; occorre introdurre nel circuito equivalente l'impedenza Z_{em} che rappresenta questo accoppiamento elettro-meccanico.

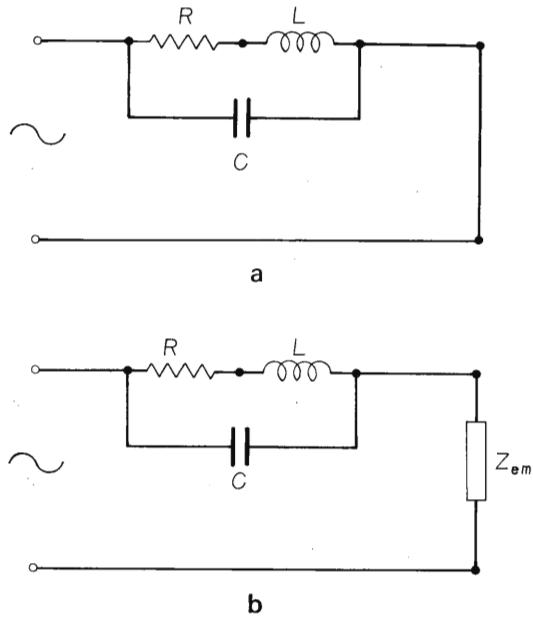


Fig. VIII.5 - Circuito equivalente di un altoparlante a bobina mobile: in a) *si ha il caso di bobina bloccata; in* b) *l'altoparlante funziona in condizioni normali.*

In figura VIII.6 è riportato l'andamento dell'impedenza di un altoparlante in funzione della frequenza; essa viene facilmente determinata misurando tensione e corrente ai morsetti dell'altoparlante al variare della frequenza e facendone il rapporto. Si nota un picco di impedenza alle basse frequenze, impedenza che, in generale, è quasi totalmente reattiva. Tale picco è dovuto alla risonanza meccanica dell'altoparlante: massa di bobine e membrana, e sospensioni elastiche costituiscono un sistema oscillante che può entrare in risonanza; ciò costituisce un limite all'uso dell'altoparlante alle basse

frequenze. A frequenze maggiori si ha una banda in cui l'impedenza è costante e si può ritenere resistiva; questo valore, in figura 7,5 ohm, può essere considerato come impedenza dell'altoparlante. Valori tipici di impedenza sono 4, 8, 16 Ω. A frequenze ancora più alte si nota che l'impedenza cresce; infatti incomincia ad avere influenza la reattanza della bobina, che è data da $2\pi fL$ e perciò cresce al crescere della frequenza.

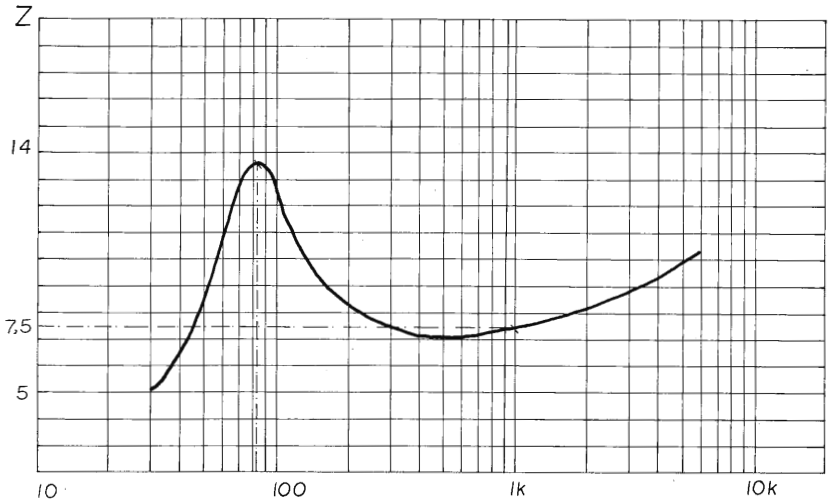


Fig. VIII.6 - Andamento dell'impedenza dell'altoparlante a bobina mobile al variare della frequenza.

2) *Altoparlanti a nastro.*

Sono simili ai precedenti, solo che la bobina è sostituita da un unico conduttore 1, in fig. VIII.7 a, ripiegato e posto tra le espansioni polari di un magnete 2. Il nastro ha la funzione della bobina e contemporaneamente anche quella della membrana, dato che le sue vibrazioni determinano compressioni e rarefazioni dell'aria circostante. Data la leggerezza, ha un ottimo comportamento alle alte frequenze; ha però l'inconveniente di essere fragile. Non è possibile impiegarlo per riprodurre le basse frequenze, dato che il grande traferro non permette un campo magnetico intenso; la sensibilità è bassa e le oscillazioni sono di ampiezza limitata.

Uno schema di altoparlante a nastro, nella sua forma più semplice, è dato in figura VIII.7 a.

Gli altoparlanti a trasformatore pneumatico ESS Heil possono essere considerati un'estensione dell'altoparlante a nastro. In figura VIII.7 b, c sono riportati disegni che ne illustrano la struttura. Un diaframma flessibile più volte ripiegato porta sulla sua superficie delle bande conduttrici ed è posto fra le espansioni polari di potenti magneti, trovandosi così soggetto ad un campo magnetico molto intenso. Alle bande conduttrici è applicato il segnale elettrico che si

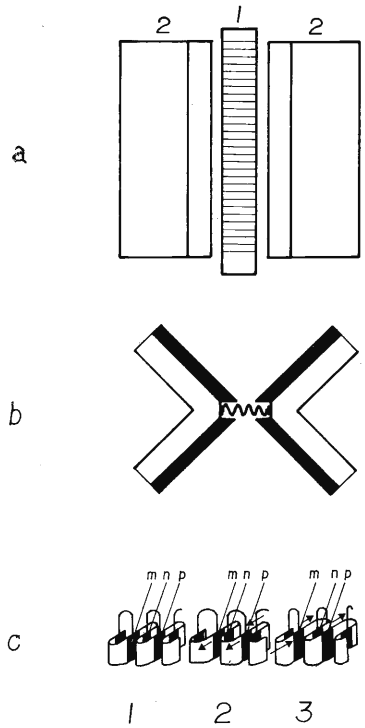


Fig. VIII.7 - a) *Schema di altoparlante a nastro;* b, c) *altoparlante a nastro (tipo Heil ESS a trasformatore pneumatico), con particolare che ne illustra il funzionamento.*

vuole trasformare in energia acustica; esse però sono collegate in modo che bande vicine sono percorse dalla corrente in senso opposto e perciò sono soggette a forze dirette in senso opposto. In figura VIII.7 c 1) sono raffigurate alcune bande, in condizione di assenza di segnale.

Durante una semionda del segnale di ingresso, le bande conduttrici, immerse nel campo magnetico e percorse da corrente, si muovono; se la banda *m* tende a spostarsi verso destra, la banda *n* si muove in senso opposto; di conseguenza le bande *m* e *n* si avvicinano, mentre aumenta la distanza fra le bande *n* e *p*. Si ha la situazione di fig. VIII.7 c 2). L'aria risulta espulsa dallo spazio fra le bande *m* e *n* ed aspirata nello spazio fra *n* e *p*. Durante l'altra semionda si ha la situazione opposta, raffigurata in fig. VIII.7 c 3). Il tutto può essere paragonato a un soffietto. Se le pieghe del diaframma sono ravvicinate e di superficie ampia, si ha che la velocità con cui l'aria è aspirata o espulsa è sensibilmente maggiore della velocità con cui si muove il diaframma; il sistema ha perciò un rendimento notevolmente superiore al rendimento dell'altoparlante a nastro. Il nome di trasformatore pneumatico deriva proprio da questa capacità di trasformare la velocità di spostamento del diaframma in una velocità sensibilmente maggiore di oscillazione delle molecole di aria. Si noti che si tratta di un diffusore di concezione radicalmente diversa dagli altoparlanti in uso finora; è una soluzione di indubbia validità, soprattutto per la riproduzione delle frequenze medie e alte.

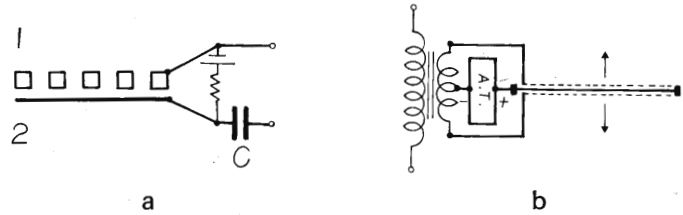


Fig. VIII.8 - Altoparlante elettrostatico: a) *tipo semplice;* b) *tipo push-pull.*

Buona risposta di frequenza e ai transitori, alto rendimento, ampio angolo di irradiazione sensibilmente indipendente dalla frequenza, autoraffreddamento dovuto all'aria fresca aspirata, robustezza e costo competitivo costituiscono le caratteristiche principali di questo altoparlante.

3) *Altoparlante elettrostatico o a condensatore.*

Un esempio è dato in figura VIII.8 a. Le due armature del condensatore sono una fissa forata 1 e l'altra mobile 2, costituita da un foglio di materiale plastico che può essere o metallizzato per evaporazione o ricoperto di un sottile foglio metallico; è questa se-

conda armatura che si comporta come membrana. Se infatti applichiamo una differenza di potenziale alle due armature, si manifesta una forza di attrazione tra di esse e di conseguenza l'armatura mobile tende a spostarsi verso l'armatura fissa; se la tensione applicata è un segnale audio, l'armatura mobile vibra e determina compressioni e rarefazioni dell'aria circostante. È però necessario applicare contemporaneamente una differenza di potenziale continua ed elevata (2.000-3.000 V). Infatti la forza d'attrazione è proporzionale al quadrato della tensione applicata, quindi lo spostamento dell'armatura non è lineare con il segnale audio e ciò è causa di distorsione; la presenza di una tensione continua sovrapposta consente di ottenere una riproduzione fedele. Affinché la tensione continua non risulti applicata anche all'amplificatore, si possono usare un condensatore di accoppiamento *C* oppure un trasformatore che la blocchino; la seconda soluzione è spesso preferita, in quanto consente di adattare l'impedenza dell'altoparlante all'impedenza dell'amplificatore.

Pregi di questo altoparlante sono la leggerezza e il fatto di non richiedere grande rigidità della membrana, dato che ogni punto della membrana stessa è soggetto alla forza di attrazione; il comportamento è perciò buono alle medie e alte frequenze. La possibilità di spostamenti limitati non consente un altrettanto buon funzionamento alle basse frequenze. Per aumentare lo spostamento si può usare il tipo push-pull di figura VIII.8 b, il cui funzionamento è analogo al tipo più semplice precedente. Da notare inoltre che la frequenza di risonanza meccanica è relativamente alta e anche questo fatto ne impedisce l'uso a frequenze basse. Un secondo limite di questo tipo di altoparlante è l'esigenza di una tensione di polarizzazione elevata necessaria, come si è visto, per ridurre la distorsione.

4) *Altoparlante ionofonico o ad effetto corona.*

Si basa sull'effetto corona; questo consiste nel fatto che, se alla superficie di un conduttore vi è un campo elettrico sufficientemente intenso, avviene la ionizzazione degli strati di aria vicini al conduttore stesso; il nome deriva dal fatto che il fenomeno si ha nelle linee ad alta tensione e si manifesta come una luminescenza attorno al conduttore. L'altoparlante consiste in una camera di quarzo in cui un generatore eroga potenza a radiofrequenza ad un livello tale di tensione da provocare effetto corona; se la radiofrequenza è modulata dal segnale audio, l'intensità della scarica varia col segnale stesso e l'aria, a sua volta, subisce delle compressioni e rarefazioni: si ottiene così l'onda sonora.

Questo tipo di altoparlante non ha limiti alle alte frequenze, dato che non è presente alcuna membrana; non si comporta però altrettanto bene alle basse frequenze.

VIII.2. Casse acustiche, trombe e sistemi multipli di altoparlanti

Si è visto che lo scopo dell'altoparlante è di trasformare energia elettrica in energia acustica, irradiata nell'ambiente; il rendimento di questa conversione dipende però non solo dalle caratteristiche dell'altoparlante, ma anche dalla struttura in cui esso è inserito.

Le casse acustiche e le trombe consentono sia un aumento dell'efficienza della conversione (cioè a parità di potenza elettrica, la potenza acustica è maggiore), sia la concentrazione dell'energia acustica nelle direzioni volute: conseguenza di entrambi questi fatti è una maggiore intensità nelle zone di ascolto.

Il problema può essere visto sotto l'aspetto dell'adattamento dell'impedenza acustica. Si definisce come impedenza acustica Z di un mezzo sonoro il rapporto

$$Z = \frac{p}{v \cdot A}$$ dove

p = pressione sonora;

v = velocità delle particelle le cui vibrazioni determinano l'onda sonora;

A = superficie unitaria perpendicolare in ogni punto alla direzione della propagazione dell'onda sonora.

Si può fare a questo punto un'analogia con l'impedenza elettrica. In un circuito elettrico, il massimo di trasferimento di potenza da un generatore al carico si ha quando la resistenza del carico è uguale alla resistenza interna del generatore (fig. VIII.9 a: $R_g = R_c$) o comunque quando è inserito un dispositivo adattatore tra generatore e carico, tale che il generatore veda come carico una resistenza pari a quella interna (fig. VIII.9 b: $R_i = R_g$): è il cosiddetto adattamento di impedenza. Nel caso acustico, anziché il generatore elettrico si ha la membrana vibrante dell'altoparlante, che ha un'elevata impedenza acustica; il carico è costituito dall'aria libera dell'ambiente, cui corrisponde un'impedenza acustica bassa: non vi è quindi adattamento. Affinché sia massima la potenza sonora trasmessa dall'altoparlante

all'aria dell'ambiente, occorrono dispositivi che realizzino l'adattamento tra l'alta impedenza della membrana e la bassa impedenza dell'aria questi dispositivi sono le casse acustiche e le trombe.

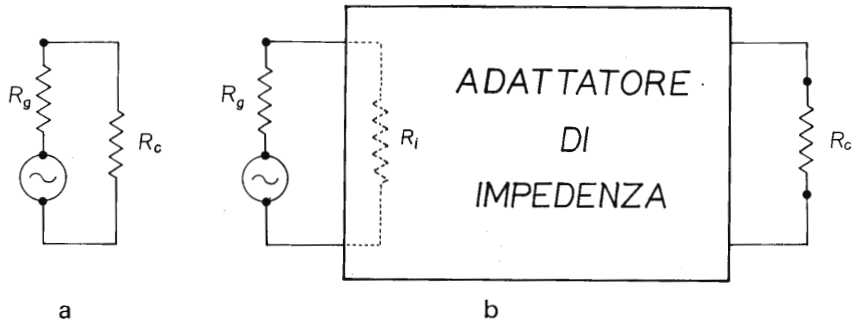


Fig. VIII.9 - Il problema dell'adattamento di impedenza: a) *la resistenza del carico è uguale alla resistenza del generatore;* b) *le due resistenze non sono uguali e perciò è inserito un dispositivo adattatore con resistenza di ingresso uguale alla resistenza del generatore.*

1) *Le casse acustiche.*

Lo *schermo piano* (detto anche baffle piano) può essere considerato, al limite, l'esempio più semplice di cassa acustica; la sua introduzione permette di evitare il cosiddetto cortocircuito acustico o comunque di aumentare il rendimento alle basse frequenze. Consideriamo infatti la figura VIII.10 a. Quando la membrana dell'altoparlante vibra, essa determina delle compressioni e rarefazioni nell'aria circostante. Si consideri ciò che succede ad un dato istante, mentre la membrana ad esempio si sposta da sinistra a destra: le molecole di aria che si trovano a destra della membrana risultano compresse, mentre alla sinistra della membrana stessa si ha un'aspirazione di molecole d'aria, cioè una rarefazione. Di conseguenza si hanno due onde sonore che sono irradiate nello spazio e queste due onde sono in opposizione di fase; ciò può essere causa di inconvenienti alle basse frequenze. Infatti se l'onda prodotta dal lato destro della membrana raggiunge la faccia sinistra della stessa (vedi fig. VIII.10 a), prima che la posizione della membrana muti sensibilmente, la compressione può compensare in parte la rarefazione, con la conseguenza di una ammortizzazione del movimento della membrana e quindi di una diminuzione del rendimento dell'altoparlante: si dice che si è in

presenza di un cortocircuito acustico. Il fenomeno suddetto si verifica alle basse frequenze, e precisamente alle frequenze cui corrisponde una lunghezza d'onda maggiore delle dimensioni dell'altoparlante.

La presenza di uno schermo, come in fig. VIII.10 b, consente di separare le due zone di aria a destra e a sinistra della membrana. La soluzione è però solo apparentemente semplice: se infatti il cortocircuito acustico si ha quando il cammino acustico fra faccia anteriore e posteriore è uguale alla lunghezza d'onda, la dimensione dello schermo deve essere pari ad almeno $\lambda/2$, intendendo con λ la lunghezza d'onda massima (cioè la frequenza minima) che si vuole riprodurre; perciò se volessimo che l'altoparlante rispondesse regolarmente fino a 20 Hz, occorrerebbe uno schermo di dimensione $d = \lambda/2 = 17/2 = 8{,}5$ m, valore non facilmente realizzabile.

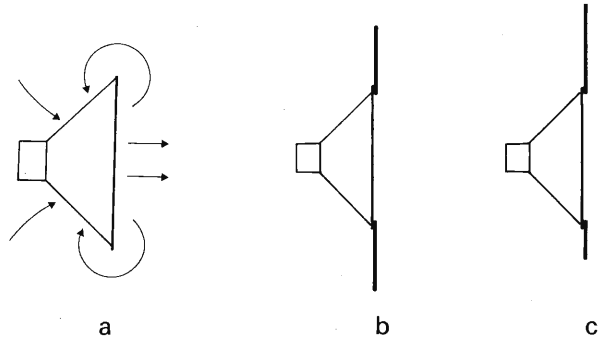


Fig. VIII.10 - a) Il cortocircuito acustico; b) uso dello schermo per evitare il cortocircuito acustico; c) altoparlante in posizione eccentrica rispetto allo schermo per un migliore controllo della interferenza fra l'onda anteriore e l'onda posteriore prodotte dalla membrana.

Se, comunque, non si devono raggiungere valori così bassi di frequenza, lo schermo costituisce una soluzione semplice e permette una buona regolarità della risposta al variare della frequenza; eventuali frequenze a cui si ha interferenza e quindi diminuzione di rendimento possono essere controllate usando uno schermo di forma irregolare o sistemando l'altoparlante in posizione eccentrica rispetto allo schermo (vedi fig. VIII.10 c).

La *cassetta aperta posteriormente* (fig. VIII.11) può essere considerata uno schermo piano ripiegato in modo da ridurre l'ingombro del sistema. Ha l'inconveniente di introdurre risonanze parassite, do-

vute al fatto che la massa di aria limitata dallo schermo può entrare in risonanza; trova applicazioni perciò solo quando non vi sono esigenze di elevata fedeltà.

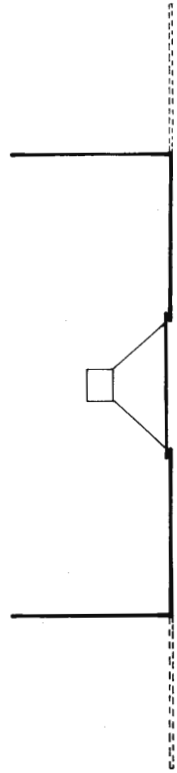


Fig. VIII.11 - La cassetta aperta posteriormente.

La *cassetta chiusa* (fig. VIII.12) è la soluzione che consente la separazione fra le zone di aria anteriore e posteriore alla membrana; si elimina così il cortocircuito acustico, con dimensioni di ingombro ridotte. Questa soluzione ha però i suoi limiti. In primo luogo la cedevolezza acustica dell'aria della cassetta, soprattutto se questa è di dimensioni ridotte, influisce sull'altoparlante, innalzandone la frequenza di risonanza e quindi pone un limite al suo uso alle basse frequenze; per evitare questo inconveniente, occorre usare casse di dimensioni non troppo ridotte e altoparlanti aventi frequenza di risonanza bassa. In secondo luogo vi è il problema delle risonanze in-

terne; queste possono essere ammortizzate rivestendo l'interno con materiale fonoassorbente. Infine vi è da notare che viene irradiata nello spazio solo un'onda sonora, quella che deriva dalle compressioni e rarefazioni della zona di aria di fronte alla membrana; l'onda sonora dovuta alla faccia posteriore rimane interna alla cassa. Si ha quindi una minore intensità acustica nello spazio di ascolto rispetto agli altri tipi, e quindi bassa efficienza.

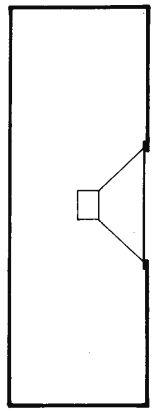


Fig. VIII.12 - La cassetta chiusa.

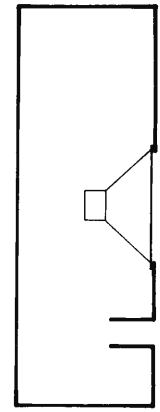


Fig. VIII.13 - Bass-reflex.

Bass-reflex (fig. VIII.13). Come si vede in figura, la cassa del tipo bass-reflex è munita di un'apertura. Fa parte delle casse del tipo risonante. Si basa sul seguente principio: se una cavità comunica con l'esterno attraverso una piccola apertura e l'aria dell'apertura che può essere a collo, come in figura, entra in vibrazione, la massa di aria dell'apertura si trova soggetta alla forza di tipo elastico dovuta al volume d'aria contenuto nella cavità; il complesso massa d'aria dell'apertura-forze elastiche costituisce un sistema oscillante che può perciò risuonare ad una determinata frequenza. Agendo sul volume della cassa e sulle dimensioni dell'apertura (sezione e lunghezza del collo), è possibile ottenere la frequenza di risonanza voluta; scegliendola opportunamente inferiore alla frequenza di risonanza dell'altoparlante, è possibile regolarizzarne la risposta alle frequenze basse, aumentando l'efficienza e l'estensione della banda riprodotta. Si può dimostrare, ricorrendo allo studio dei risuonatori di Helmholtz, che, per diminuire la frequenza di risonanza della cassa, si deve o aumen-

tare il volume d'aria della cassa stessa o aumentare la lunghezza del collo o diminuire la sezione dell'apertura.

I bass-reflex presentano, come le altre casse viste finora, il problema delle oscillazioni parassite; queste, comunque, possono essere ammortizzate efficacemente rivestendo l'interno di materiale fonoassorbente.

Il *labirinto acustico.* Un esempio è in figura VIII.14. Come il bass-reflex, si basa su fenomeni di risonanza e quindi è un diffusore ad alto rendimento. Può essere infatti considerato un tubo sonoro ripiegato su se stesso, al fine di diminuire l'ingombro; l'aria in esso contenuta risuona ad una frequenza per cui la lunghezza del tubo è uguale a $\lambda/4$. Scegliendo quindi opportunamente la lunghezza del tubo, è possibile, come per il bass-reflex, fare in modo che la frequenza di risonanza del labirinto sia in relazione con la frequenza di risonanza dell'altoparlante e quindi estendere la risposta alle basse frequenze. Le pareti interne costituenti il labirinto sono di materiale fonoassorbente e la sezione del labirinto viene opportunamente variata lungo il percorso; tali accorgimenti consentono di evitare la diminuzione di rendimento che si verifica alle frequenze multiple pari della frequenza di risonanza.

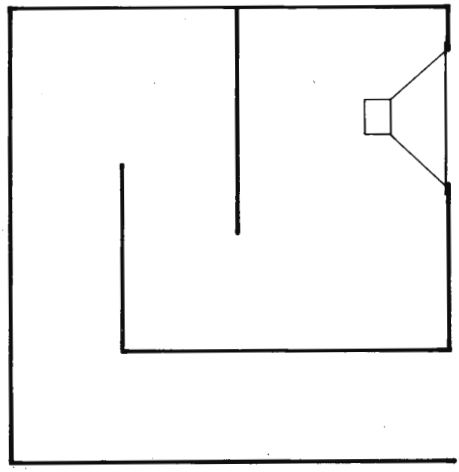


Fig. VIII.14 - Il labirinto acustico.

Infatti se l'aria di un tubo sonoro viene eccitata ad una frequenza tale per cui la lunghezza del tubo è pari a $\lambda/4$, si ha la situazione di figura VIII.15 a: l'aria, eccitata dall'altoparlante nel punto *A*, ri-

suona; le molecole di aria in ogni punto del tubo oscillano secondo il diagramma tratteggiato; la massima oscillazione si ha proprio in corrispondenza della bocca, attraverso cui le vibrazioni sono trasmesse all'ambiente; tali vibrazioni sono di ampiezza molto maggiore che in *A*. Se invece il tubo viene eccitato ad una frequenza

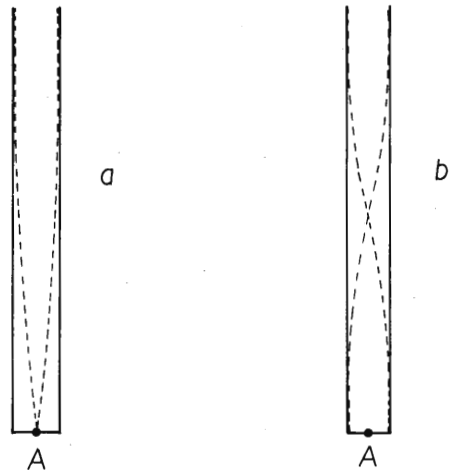


Fig. VIII.15 - Tubi sonori di lunghezza $\lambda/4$ (a) *e* $\lambda/2$ (b).

doppia, la lunghezza d'onda si dimezza e l'aria del tubo oscilla secondo il modo di figura VIII.15 b: in corrispondenza della bocca le molecole di aria vibrano come in *A*, cioè come se fossero in corrispondenza dell'altoparlante; il tubo sonoro perciò non dà alcun beneficio, il rendimento del sistema è molto minore che alla frequenza precedente; le oscillazioni sono ampie come in figura solo se la membrana vibra con notevole ampiezza. Per attenuare questo difetto, la sezione del labirinto viene opportunamente variata lungo il percorso; inoltre le pareti interne sono rivestite di materiale fonoassorbente in modo da attenuare le risonanze parassite dovute alle riflessioni interne. Rimane comunque sempre il fatto che, malgrado questi correttivi, il labirinto funziona in modo efficiente solo in uno stretto intervallo di frequenze, quello per cui è $L = \lambda/4$.

2) *La tromba.*

Un esempio è in figura VIII.16. La forma può essere conica o iperbolica o esponenziale; quest'ultima soluzione è la più adottata, in

quanto permette di avere una banda riprodotta relativamente estesa anche nel campo delle basse frequenze, senza che siano necessarie dimensioni proibitive. La sezione della tromba varia gradualmente dalla membrana dell'altoparlante alla bocca: questo elimina le riflessioni, cioè consente l'adattamento dell'alta impedenza della membrana alla bassa impedenza dell'aria dell'ambiente, di cui si è parlato all'inizio del paragrafo. Il rendimento è perciò elevato, dell'ordine del 10-20 %. Si pone però il problema delle dimensioni. Infatti, per non avere riflessioni in corrispondenza della bocca, le dimensioni trasversali di questa devono essere maggiori di $\lambda/2$; più bassa è perciò la frequenza che si vuole riprodurre, maggiori sono le dimensioni della bocca e più lunga è la tromba. Un parziale rimedio consiste nell'incurvare l'asse della tromba, realizzando così le trombe ripiegate; difficoltà costruttive e costo ne limitano però la diffusione.

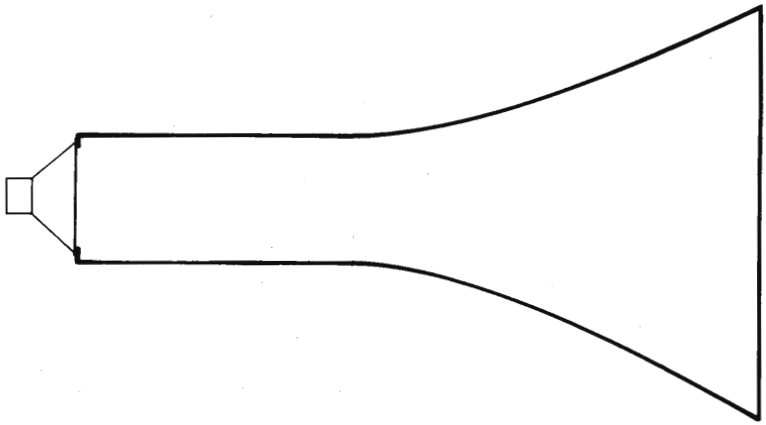


Fig. VIII.16 - La tromba.

Ne deriva quindi l'impossibilità di coprire, con una sola tromba, tutto lo spettro sonoro. Un'altra caratteristica della tromba è la direttività: concentra infatti l'energia sonora in un angolo ristretto dell'ambiente, evitando quindi che si disperda in zone in cui non è previsto l'ascolto.

3) *Le casse asservite (casse attive).*

Le casse asservite rappresentano una soluzione del problema della riproduzione delle frequenze basse di natura tecnica completamente differente dagli esempi precedenti; si riesce ad ottenere un

buon rendimento, contenendo le dimensioni entro limiti accettabili. Si basano sul principio della retroazione; lo schema a blocchi è rappresentato in figura VIII.17. Attraverso una rete di reazione 1, si riporta all'ingresso dell'amplificatore 3 un segnale elettrico che dipende dalla risposta dell'altoparlante; questo segnale viene confrontato con il segnale di ingresso 2 e la differenza tra i due è applicata all'ingresso dell'amplificatore 3 in modo da correggere la risposta dell'altoparlante. In sostanza, se l'altoparlante è causa di distorsione, si fa in modo che, attraverso rete di reazione ed amplificatore, sia presente alla sua bobina mobile un segnale tale da produrre un effetto opposto al segnale non desiderato.

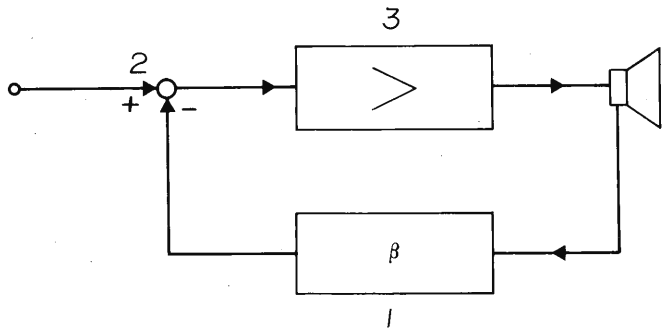
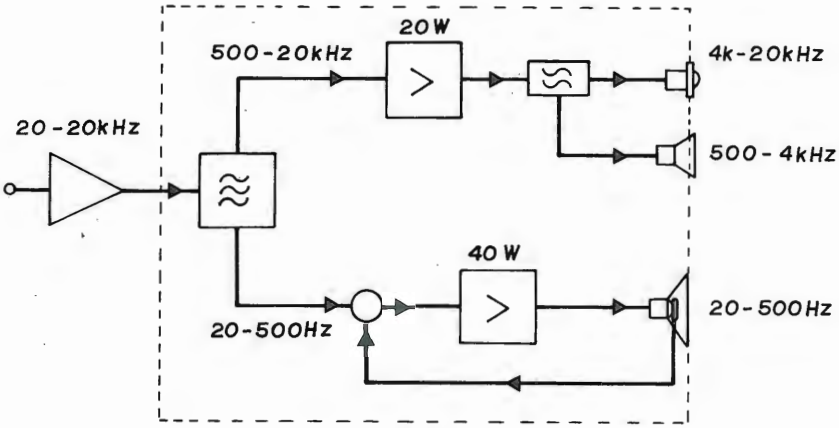


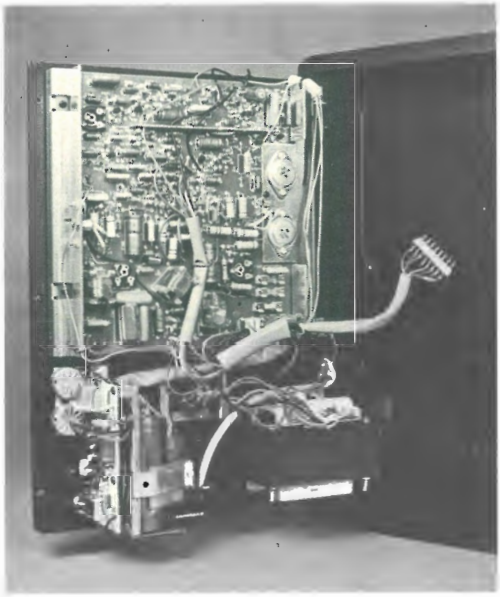
Fig. VIII.17 - Schema a blocchi di un sistema reazionato.

Diversi sono i modi coi quali si ottiene un segnale elettrico dipendente dalla risposta dell'altoparlante: si possono utilizzare o un dispositivo sensibile alla pressione dell'onda sonora o un rivelatore sensibile ai movimenti della membrana o una bobina. Il segnale elettrico può essere proporzionale o allo spostamento dalla posizione di riposo o alla velocità o alla accelerazione del cono: i dispositivi più usati sono dell'ultimo tipo. I vantaggi delle casse asservite sono conseguenza degli aspetti positivi della reazione; in particolare abbiamo diminuzione di distorsione e aumento di estensione della banda verso le frequenze basse.

Un esempio di cassa asservita è dato nelle figure VIII.18 a e b. Si tratta delle MFB (Motional Feed Back) della Philips. All'ingresso un filtro attivo a 500 Hz divide il campo di frequenze; le frequenze da 500 Hz a 20 kHz sono inviate all'amplificatore da 20 W per i toni medi e alti; attraverso un filtro passivo a 4 kHz, sono smistate al



a



b1

b2

Fig. VIII.18 - Un esempio di cassa asservita (MFB della Philips). In b) *si vede la cassa; lo schema a blocchi* (a) *ne sintetizza il funzionamento (Da: HI-FI INFO - Philips).*

tweeter le frequenze alte (da 4 kHz a 20 kHz) e all'altoparlante per i toni medi le frequenze medie (da 500 Hz a 4 kHz). Invece le frequenze basse, da 20 Hz a 500 Hz, alimentano un amplificatore controreazionato e quindi il woofer; si noti, all'interno dell'altoparlante, schematizzata la presenza dell'elemento piezo-ceramico fotografato in fig. VIII.18 b 2 che dà un segnale elettrico in funzione dell'accelerazione della membrana; è tale segnale che, confrontato col segnale di ingresso, permette la riduzione della distorsione e una migliore risposta alle basse frequenze. In questa cassa la reazione è attuata soltanto alle basse frequenze, in quanto è in questa zona della banda acustica che si presentano in misura maggiore le distorsioni.

4) *Sistemi multipli di altoparlanti.*

Si è già visto nel paragrafo VIII.1 come risulti impossibile realizzare un altoparlante in grado di servire tutta la banda audio; in figura VIII.4 è rappresentato un sistema a tre altoparlanti. Un altro esempio è riportato in fig. VIII.18 ed è stato descritto più sopra. Quantunque il sistema a più altoparlanti sia evidentemente più costoso, tuttavia i risultati ottenuti nella riproduzione giustificano ampiamente la spesa aggiuntiva.

In figura VIII.19 a è rappresentato un sistema a tre altoparlanti, ognuno dei quali è progettato così da riprodurre in modo efficace un determinato campo di frequenze audio (il tweeter le frequenze alte; lo squawker o mid-range le frequenze medie; il woofer le frequenze basse).

Occorre però fare in modo che ad ogni altoparlante pervengano solo le frequenze che è in grado di riprodurre; ciò si ottiene inserendo un filtro fra amplificatore finale e sistema di altoparlanti: è il cosiddetto filtro di « cross-over », costituito di induttori, generalmente in aria, e di condensatori, con dielettrico di carta o elettrolitici. Le caratteristiche del filtro sono indicate in fig. VIII.19 b: le frequenze superiori ad un certo valore giungono attenuate al woofer (curva 1); le frequenze al di sotto e al di sopra di due frequenze limite sono attenuate per lo squawker (curva 2); le frequenze al di sotto di un determinato valore sono attenuate per il tweeter (curva 3). I punti in cui le caratteristiche di attenuazione si intersecano si chiamano punti di cross-over, e le corrispondenti frequenze f_1 e f_2 sono le frequenze di cross-over o frequenze di taglio, a cui l'attenuazione è di 3 dB. Il comportamento reale del sistema però non segue esattamente le curve idealizzate in figura: vi è infatti da tener presente che il filtro è collegato agli altoparlanti, le cui caratteristiche, dipendendo dalla frequenza, agiscono sul filtro stesso. Il filtro quindi deve essere pro-

gettato tenendo conto delle particolari caratteristiche degli altoparlanti usati e perciò dà buoni risultati solo se usato con quel sistema di altoparlanti.

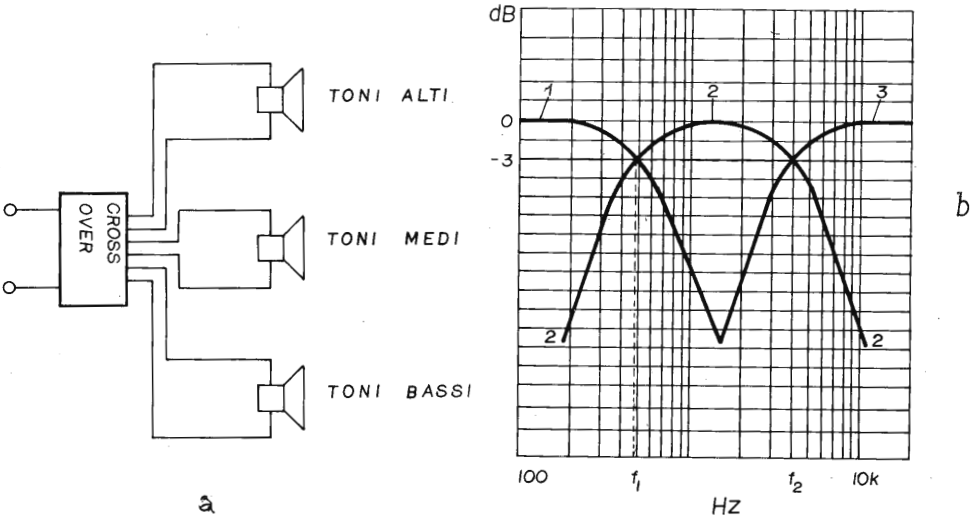


Fig. VIII.19 - Sistema a tre altoparlanti (a), *con filtri e relative caratteristiche ideali* (b).

VIII.3. Caratteristiche degli altoparlanti e loro misura

In questo paragrafo si considerano nei particolari le caratteristiche degli altoparlanti, di cui si è già accennato nei precedenti paragrafi. Ci si limita ai dati oggettivi, cioè misurabili; anche se l'orecchio dell'ascoltatore è in ultima analisi il giudice della qualità di un altoparlante, tuttavia un esame delle caratteristiche oggettive può permettere un confronto di massima fra gli altoparlanti.

1) *La curva di risposta in frequenza.*

La pressione acustica generata da un altoparlante dipende da numerosi fattori, oltre che dalla frequenza: dalla particolare posizione in cui è posto il misuratore, dall'ambiente, da come l'altoparlante è montato, dalla tensione applicata alla bobina mobile. Per una misura oggettiva, occorre perciò specificare in quali condizioni ci si trova. Comunemente si intende per risposta di un altoparlante la pressione acustica sull'asse dello stesso, ad una distanza di un metro, quando è alimentato con una tensione di 1 V (oppure con una potenza elet-

trica di 1 W o 50 mW o 25 mW), in camera anecoica, ad una determinata frequenza. Tutto ciò ha significato per sistemi di altoparlanti a radiazione anteriore. La rilevazione è fatta mediante microfono opportunamente tarato. Se si varia la frequenza del segnale elettrico applicato all'altoparlante da 20 Hz a 20.000 Hz, mantenendo invariate le altre condizioni, si ottiene la cosiddetta curva di risposta; un esempio è dato in fig. VIII.20. La risposta viene espressa in dB, riferendosi ad una pressione di riferimento; si considera cioè 20 log $P(f)/P_o$, dove $P(f)$ è la pressione acustica ad una frequenza f e P_o è la pressione di riferimento.

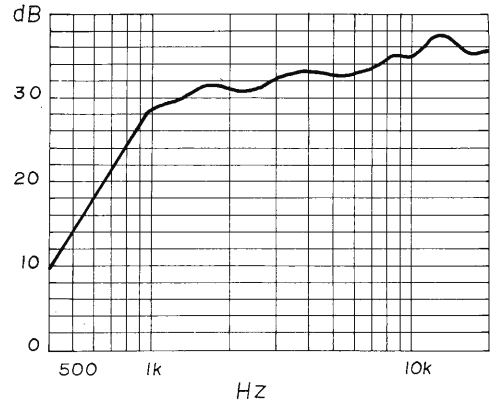


Fig. VIII.20 - Curva di risposta di un altoparlante.

In una cassa ideale la curva dovrebbe essere piatta; un andamento irregolare indica infatti che l'altoparlante risponde in modo diverso alle varie frequenze e quindi distorce. Non bisogna però dare un giudizio definitivo su una cassa in base al solo esame di una curva di risposta in camera anecoica e nelle particolari condizioni viste. Si è già detto che la risposta dipende dall'ambiente (dimensioni, mobili, ecc.) e che il miglior giudice è l'ascoltatore; però la curva di risposta, unita alle altre caratteristiche oggettive, può dare un'idea di come sarà il comportamento della cassa nell'ambiente di ascolto.

2) *Direttività.*

La direttività consiste nel fatto che, a parità di distanza dal centro dell'altoparlante e di frequenza, la risposta dipende dall'angolo che la congiungente ascoltatore-altoparlante fa con l'asse dell'altoparlante stesso.

La fig. VIII.21 illustra questo comportamento; l'onda di pressione è minore in *B* e in *C* rispetto ad *A*. La visualizzazione del fenomeno si ottiene con i diagrammi direzionali. Mantenendo fissa la distanza del punto di ascolto dal centro dell'altoparlante, si misura, mediante microfono, la pressione acustica in diversi punti dello spazio di ascolto; scelta una unità di misura, si rappresenta la pressione acustica in coordinate polari, cioè su ogni raggio in partenza dall'altoparlante si traccia un segmento proporzionale alla pressione acustica nel punto che si trova in quella direzione.

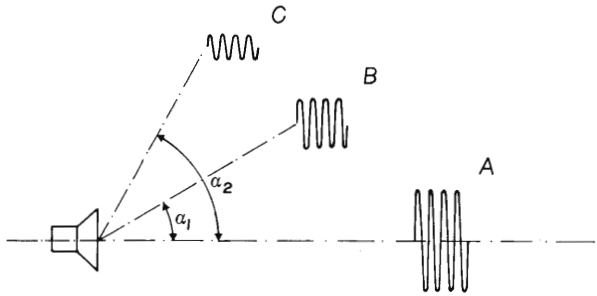


Fig. VIII.21 - Comportamento direttivo dell'altoparlante (Da: Applicazioni Componenti Elettronici - Philips).

La rilevazione può essere fatta automaticamente, in camera anecoica, ponendo il diffusore su una piastra ruotante; si registra la tensione di uscita del microfono misuratore, tenuto fisso alla distanza di un metro dall'altoparlante, su un diagramma circolare (coordinate polari), che ruota sincronicamente con la piastra. Esempi di diagrammi di direttività sono dati in fig. VIII.22. Si noti come la direttività dipenda dalla frequenza e in particolare come il fascio di energia acustica tenda a concentrarsi in un angolo più ristretto quanto più alta è la frequenza.

Tutto ciò vale per gli altoparlanti aventi simmetria circolare, in quanto qualsiasi piano in cui si fa la misura si trova nelle stesse condizioni rispetto all'altoparlante. Diverso è il caso, ad esempio, degli altoparlanti ellittici; l'indagine andrebbe fatta in ogni piano perpendicolare all'altoparlante, ottenendo così un solido che permette la visualizzazione della direttività nello spazio; spesso però una rappresentazione della direttività mediante diagrammi in due piani perpendicolari è sufficiente a dare un'idea del comportamento dell'altoparlante.

In analogia a quanto si fa per le antenne, si può considerare un indice di direttività, che dà un'indicazione della concentrazione dell'energia acustica nello spazio di ascolto. Esso si definisce come il rapporto, espresso in dB, tra l'energia emessa da una sorgente che irradi ugualmente in tutte le direzioni e l'energia emessa dall'altoparlante in esame, quando in entrambi i casi la pressione acustica nella direzione di massimo irraggiamento è la stessa; la misura è fatta in camera anecoica. Un alto indice significa che l'altoparlante in prova concentra l'energia in un angolo solido ristretto, in direzione assiale

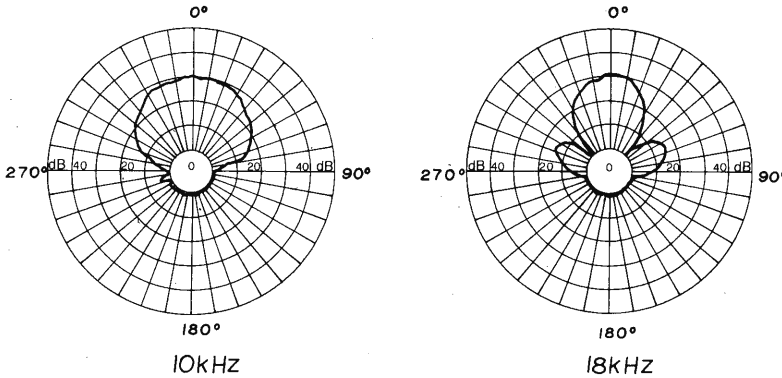


Fig. VIII.22 - Esempi di diagrammi direzionali. Si riferiscono ad uno stesso altoparlante.

Queste misure sulla direttività, quantunque effettuate in camera anecoica o nello spazio libero, sono importanti per quanto riguarda l'impiego dell'altoparlante in ambiente chiuso. In primo luogo ci dicono che esistono, nell'ambiente, zone migliori di ascolto, precisamente quelle in cui l'altoparlante concentra l'energia sonora. In secondo luogo, se l'altoparlante ha bassa direttività ed è addossato ad una parete, diventa importante anche l'energia acustica irradiata posteriormente e che perviene all'ascoltatore dopo essere stata riflessa dalle pareti.

3) *Potenze ed efficienza (o rendimento).*

Sono in giuoco due tipi di potenze, quella elettrica applicata alla bobina mobile e la potenza acustica ceduta all'ambiente.

La potenza elettrica può essere ottenuta moltiplicando il quadrato del valore efficace della corrente che passa nella bobina mo-

bile per la componente resistiva dell'impedenza dell'altoparlante. La potenza acustica si determina misurando la pressione acustica in punti di ascolto su di una superficie sferica avente per centro la sorgente-altoparlante; si calcola quindi l'intensità dell'onda sonora, che è la potenza acustica riferita all'unità di superficie (W/cm^2), e infine si sommano tali valori in modo da coprire tutta la superficie sferica attorno alla sorgente. Si ottiene in tal modo la potenza acustica ceduta all'ambiente.

Si considera come efficienza dell'altoparlante il rapporto fra la suddetta potenza acustica e la potenza elettrica applicata alla bobina mobile. Valori comuni sono dell'ordine di qualche unità per cento; i valori di efficienza vengono sovente espressi in dB, come riportato nel diagramma di fig. VIII.23.

Il rendimento è una caratteristica molto importante; infatti, dato l'ambiente da sonorizzare, si può risalire dalla cubatura alla potenza acustica necessaria a produrre un dato livello sonoro; in base al rendimento dell'altoparlante, si può risalire alla potenza elettrica richiesta all'amplificatore.

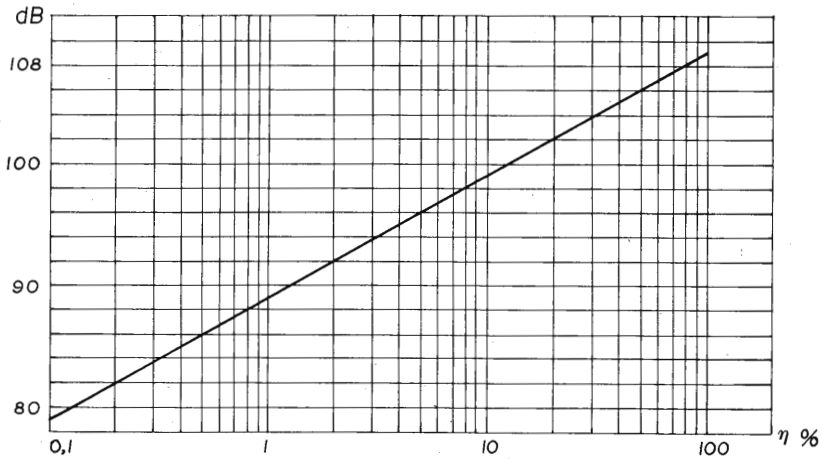


Fig. VIII.23 - Diagramma che consente il passaggio dai valori del rendimento espresso in percentuale ai valori del rendimento espresso in dB e viceversa.

4) *Potenza massima e distorsione.*

L'altoparlante può essere causa di vari tipi di distorsione.

a) *Distorsione di non linearità:* si ha quando non vi è proporzionalità fra segnale acustico irradiato e segnale elettrico. La non pro-

porzionalità o non linearità fa sì che nel segnale acustico siano presenti armoniche del segnale elettrico che si vuole riprodurre: per questo la distorsione di non linearità si chiama anche distorsione armonica.

La mancanza di linearità è pure causa della *distorsione di intermodulazione.* Se infatti alla bobina mobile sono presenti due segnali elettrici di frequenza diversa, f_1 e f_2, nell'ambiente abbiamo non solo le frequenze f_1 e f_2 desiderate, ma anche $f_2 - f_1$, $f_2 + f_1$, $f_2 - 2f_1$, $f_2 + 2f_1$ ecc.

La misura della distorsione può essere fatta prelevando il segnale di uscita di un microfono posto di fronte all'altoparlante e analizzandolo mediante distorsiometro o analizzatore d'onda. Il microfono deve essere tale da non introdurre distorsione.

Per quanto riguarda la distorsione armonica, si alimenta l'altoparlante con un segnale a frequenza f, ad esempio 500 Hz; se l'altoparlante distorce, avremo la presenza, all'uscita del microfono, di tensioni a frequenza $2f$, $3f$ ecc. (2^a, 3^a armonica) cioè 1.000 Hz, 1.500 Hz ecc.

Si intende per distorsione di seconda armonica D_2 il rapporto fra l'ampiezza o il valore efficace della tensione a frequenza $2f$ e ampiezza o valore efficace della fondamentale, cioè della tensione a frequenza f; analogamente per la distorsione di terza, quarta... ennesima armonica. Tale rapporto si esprime in %. La distorsione totale è la radice quadrata della somma dei quadrati delle singole distorsioni:

$$D_t = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + \ldots + D_n^2}$$

È da tenere presente che per l'orecchio sono più fastidiose le armoniche dispari (3^a, 5^a, ...), di conseguenza i valori delle distorsioni non sono da porsi su uno stesso piano, dal punto di vista del gradimento di una riproduzione; d'altra parte però si deve dire che una seconda armonica presente, anche se non è sgradevole, indica che il segnale riprodotto non è fedele all'originale e questo è un fatto non trascurabile, se alta fedeltà vuol dire, idealmente, ricreare nell'ambiente domestico di ascolto le stesse sensazioni che si ottengono in una sala di concerto.

La distorsione armonica è causata dalla non linearità del trasduttore elettromeccanico e perciò si verifica in misura maggiore in presenza di ampi segnali e quindi ampie oscillazioni del diaframma. Si ha di conseguenza che è più sentita dove si hanno oscillazioni di ampiezza maggiore, e cioè alle frequenze medie e basse piuttosto che alle alte; d'altra parte l'energia acustica di un programma è concentrata, statisticamente, nella banda delle frequenze basse e medio-

basse ed è quindi in questo campo che interessa soprattutto analizzare il comportamento di una cassa acustica nei riguardi della distorsione. Inoltre, se la prova è fatta a 500 Hz, le armoniche sono a 1.000 Hz, 1.500 Hz, 2.000 Hz ecc., cioè cadono in una gamma di frequenze a cui l'orecchio è molto sensibile (non così si potrebbe dire se la prova fosse fatta a 10 kHz: la seconda armonica ha frequenza 20 kHz ed è perciò già al limite dell'udibilità). Tutto questo ci porta a concludere che è opportuna una maggiore attenzione al campo delle frequenze medie e basse. Ciò però non esclude l'esigenza di una accurata costruzione dell'altoparlante per le alte frequenze: in questa banda la distorsione, anche se limitata alla terza armonica, può essere molto fastidiosa all'orecchio.

Una seconda conseguenza del fatto che la distorsione dipende dall'ampiezza del segnale è che occorre stabilire il livello sonoro a cui è fatta la misura; se si aumenta il livello sonoro, aumenta anche la distorsione. Quindi, affinché abbia senso il confronto fra due altoparlanti, la distorsione deve essere rilevata a parità di livello sonoro.

Un secondo metodo di misura della distorsione consiste nell'alimentare l'altoparlante non con un segnale puramente sinusoidale, ma con un segnale di rumore con una determinata larghezza di banda; si preferisce allora parlare di residui armonici, di significato analogo alle armoniche di cui si è detto. I risultati, se pure più difficili da analizzare da un punto di vista teorico, sono però più significativi, in quanto, nelle condizioni effettive di impiego, l'altoparlante difficilmente lavora con un segnale puramente sinusoidale.

Per quanto riguarda la misura della distorsione di intermodulazione, si può operare in modo analogo a quanto si fa per la distorsione armonica, alimentando l'altoparlante con due segnali puramente sinusoidali e analizzando la tensione d'uscita del microfono misuratore. Vi è da dire però che i risultati dipendono molto dalle frequenze scelte, per cui il confronto fra due casse acustiche, sotto questo aspetto, è relativo alle frequenze usate. D'altra parte è una prova che ci permette di avere un'idea della purezza dell'uscita, quando all'ingresso sono presenti due segnali a frequenza diversa, e in questo modo siamo più vicini alla situazione reale di impiego che nel caso di un solo segnale sinusoidale, quale si applica nella misura della distorsione armonica.

b) *Distorsione di frequenza*: si ha quando l'altoparlante non dà una risposta uniforme (si vedano il punto VIII.3.1 e la fig. VIII.20); le frequenze cui corrispondono picchi nella curva di risposta sono esaltate rispetto alle altre. Ne risulta una riproduzione "colorita", che non è fedele all'originale, anche se entro certi limiti può non essere causa di disturbi all'ascolto.

c) *Distorsione ai transitori*: si ha quando l'altoparlante non è in grado di riprodurre bruschi cambiamenti (discontinuità) del segnale di ingresso. La risposta ai transitori può essere rilevata applicando all'altoparlante un segnale costituito da cosiddetti "treni" di sinusoidi: si alternano, in sostanza, all'ingresso dell'altoparlante, intervalli in cui il segnale è nullo e intervalli in cui il segnale è costituito da un certo numero di sinusoidi (fig. VIII.24 a).

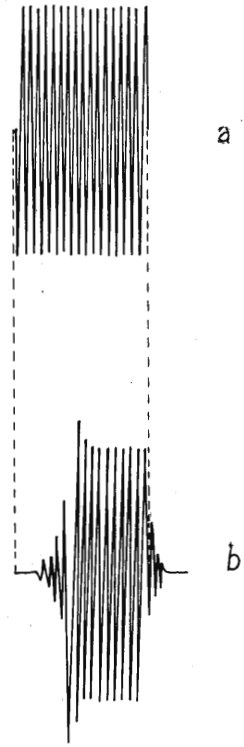


Fig. VIII.24 - Risposta dell'altoparlante a un treno di sinusoidi (tone burst): a) *pacchetto di sinusoidi;* b) *traccia di risposta.*

Per una misura della risposta si usa un microfono, a distanza di 1 metro dal diffusore, in camera anecoica; la tensione di uscita viene visualizzata, ed eventualmente fotografata, mediante l'oscilloscopio. L'esame dei treni d'onda di uscita permette un giudizio qualitativo sull'altoparlante; esso è tanto migliore quanto meno risulta

deformato il pacchetto di sinusoidi. In fig. VIII.24 b si ha un esempio di traccia di risposta. Si noti in primo luogo la presenza di un transitorio (tempo di attacco e sovraoscillazioni) all'arrivo del pacchetto di sinusoidi e quindi come occorra un intervallo di tempo prima che l'altoparlante oscilli a regime. In secondo luogo si osservi che, al termine del treno di sinusoidi, l'altoparlante non smette di oscillare immediatamente, come si vorrebbe. L'esame quindi degli oscillogrammi a diverse frequenze può permettere un confronto fra gli altoparlanti.

In mancanza di un generatore di treni di sinusoidi (*tone bursts generator*), si può utilizzare un generatore di onde quadre: l'andamento del fronte di salita e la presenza o meno di sovraoscillazioni ci danno un'idea della bontà dell'altoparlante. Indubbiamente la prova con treni di sinusoidi è più significativa, in quanto con essa l'altoparlante è sollecitato da un segnale più complesso e più vicino a situazioni reali di impiego ("attacchi" e "stacchi" di brani musicali).

d) *Distorsione per effetto Doppler.* L'effetto Doppler consiste nel fatto che, se un generatore emette un suono a frequenza f e, contemporaneamente, si muove verso l'ascoltatore, questi ha la sensazione di udire un suono a frequenza più alta; viceversa nel caso di allontanamento.

Un esempio tipico è il cambiamento di tonalità che notiamo quando un automezzo con sirena, a forte velocità, si avvicina, ci raggiunge e passa oltre. Nel caso dell'altoparlante, se è presente, sovrapposta al segnale desiderato, una oscillazione a bassa frequenza non desiderata, il diaframma si muove nei riguardi dell'ascoltatore, avvicinandosi ed allontanandosi; perciò il segnale elettrico che si vuole riprodurre non verrà udito dall'ascoltatore alla frequenza voluta, originale, ma ad una frequenza leggermente più alta o più bassa, a seconda del movimento del diaframma. Si ha perciò una modulazione di frequenza del segnale percepito.

Questo tipo di distorsione è stato eliminato con l'uso di altoparlanti diversi per diverse bande di frequenza; non possono più essere presenti oscillazioni di frequenza molto diversa sullo stesso diaframma.

Premesse queste considerazioni sulla distorsione, occorre notare che essa è strettamente legata al problema della potenza massima che si può fornire all'altoparlante e che perciò l'altoparlante può irradiare nell'ambiente. Infatti sono due i fattori che limitano il valore della potenza dell'altoparlante: in primo luogo un eccesso di potenza elettrica può danneggiare la bobina mobile; in secondo luo-

go, la riproduzione deve essere accettabile, cioè la distorsione non deve superare certi limiti, diversamente l'ascolto diventa intollerabile. Perciò si definisce come potenza massima efficace (Wrms) di un altoparlante il valore massimo di potenza elettrica che non lo danneggia e a cui la distorsione è inferiore al 5 % (1% per l'alta fedeltà). La potenza di cui si parla è la potenza musicale: si è cioè in presenza di segnali fortemente variabili, quali si hanno nella riproduzione di musica e parlato. Questo non significa però che lo stesso altoparlante sia in grado di riprodurre, senza danneggiarsi e entro quei limiti di distorsione, un segnale di prova puramente sinusoidale, applicato con continuità e a cui corrisponda la stessa potenza. In condizioni di regime sinusoidale, l'altoparlante si trova più sollecitato; comunemente la potenza musicale che si può applicare è superiore alla potenza sinusoidale di circa il 30 %.

La potenza massima, con i limiti di distorsione, è uno dei dati fondamentali dell'altoparlante, in quanto è relativamente ad essa che va scelto l'amplificatore; la potenza di questo non deve essere infatti superiore alla potenza massima dell'altoparlante, per evitare danni allo stesso o comunque distorsioni intollerabili.

5) *L'impedenza elettrica.*

Se ne è già accennato al paragrafo VIII.1, parlando degli altoparlanti a bobina mobile. Le considerazioni fatte possono essere generalizzate. Si definisce impedenza dell'altoparlante il rapporto fra la tensione ai capi dell'altoparlante e la corrente che lo attraversa. Essa può essere facilmente misurata, come in fig. VIII.25 a, se si hanno a disposizione un voltmetro e un amperometro: $Z = V/I$. Nel caso invece che si possa utilizzare solo un voltmetro, si ricorre al circuito di fig. VIII.25 b; misurando, ad una data frequenza, le tensioni ai capi di una resistenza di precisione e ai capi dell'altoparlante, si ha che $Z = \frac{V_2}{V_1} \times R$.

È importante sottolineare come l'impedenza dell'altoparlante non dipenda solo dalle caratteristiche elettriche del trasduttore (esempio: resistenza e induttanza della bobina nel caso di altoparlante a bobina mobile), ma anche dall'accoppiamento elettro-meccanico, dalle caratteristiche del sistema meccanico (massa ed elasticità), dal modo di irradiazione nell'ambiente e dall'ambiente stesso. In figura VIII.26 a si indica con Z' l'impedenza dell'altoparlante con trasduttore bloccato; essa tiene conto perciò esclusivamente delle caratteristiche elettriche del trasduttore. Nel caso di altoparlante funzionante e quin-

di libero di muoversi, si può pensare che alla Z' si aggiunga una impedenza Z_{em} che tiene conto di quei fattori di cui si è parlato; Z_{em} può essere considerata l'equivalente elettrico del sistema meccanico-acustico interessato alla irradiazione del suono. L'impedenza dell'altoparlante è la somma di Z' e Z_{em}.

L'impedenza dipende dalla frequenza del segnale; un esempio è già stato riportato in fig. VIII.6; un altro esempio di come varia la impedenza al variare della frequenza è rappresentato in fig. VIII.26 b.

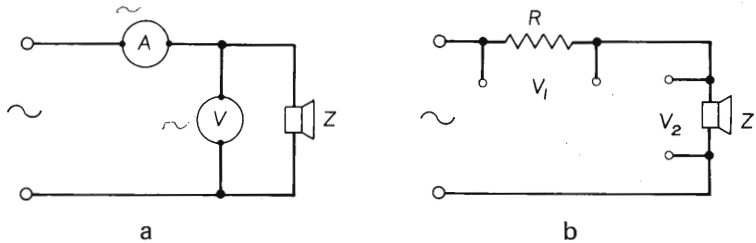


Fig. VIII.25 - Misura dell'impedenza dell'altoparlante: a) *con voltmetro e amperometro;* b) *con un voltmetro e una resistenza di precisione.*

Occorre soffermarsi su due punti fondamentali. In primo luogo si deve notare come l'impedenza non sia costante; il fatto quindi di attribuire un determinato valore all'impedenza di un altoparlante è valido solo in bande ristrette o al limite ad una sola frequenza. Si confrontino le figure VIII.6 e VIII.26 b: l'altoparlante di fig. VIII.6 può essere considerato di impedenza 7,5 Ω, in quanto tale valore rimane costante in un ampio intervallo di frequenza. Lo stesso non si può dire per il sistema di fig. VIII.26 b, in cui si vede che l'impedenza non è costante: si può attribuire un valore di impedenza all'altoparlante, però occorre tenere presente che ciò ha significato ad una sola frequenza; è più corretto quindi dare il diagramma completo dell'andamento dell'impedenza al variare della frequenza. In secondo luogo è bene mettere in rilievo il fatto che non è esatto parlare di resistenza dell'altoparlante; si pensi infatti, ad esempio nel caso dell'altoparlante a bobina mobile, al solo fatto che il trasduttore è una bobina, quindi un elemento ohmico-induttivo; ad essa si aggiunge poi, come si è visto, l'impedenza Z_{em}. In conclusione il trasduttore elettro-acustico è un'impedenza e non una semplice resistenza, come spesso si considera per semplicità quando si parla del carico dell'amplificatore finale.

L'impedenza è una caratteristica importante da considerare soprattutto in due casi: quando si connette l'altoparlante all'amplificatore e quando si vogliono usare sistemi di più altoparlanti. Il problema dell'adattamento di altoparlante e amplificatore è trattato ampiamente nel capitolo sugli amplificatori; qui basti dire che, se l'im-

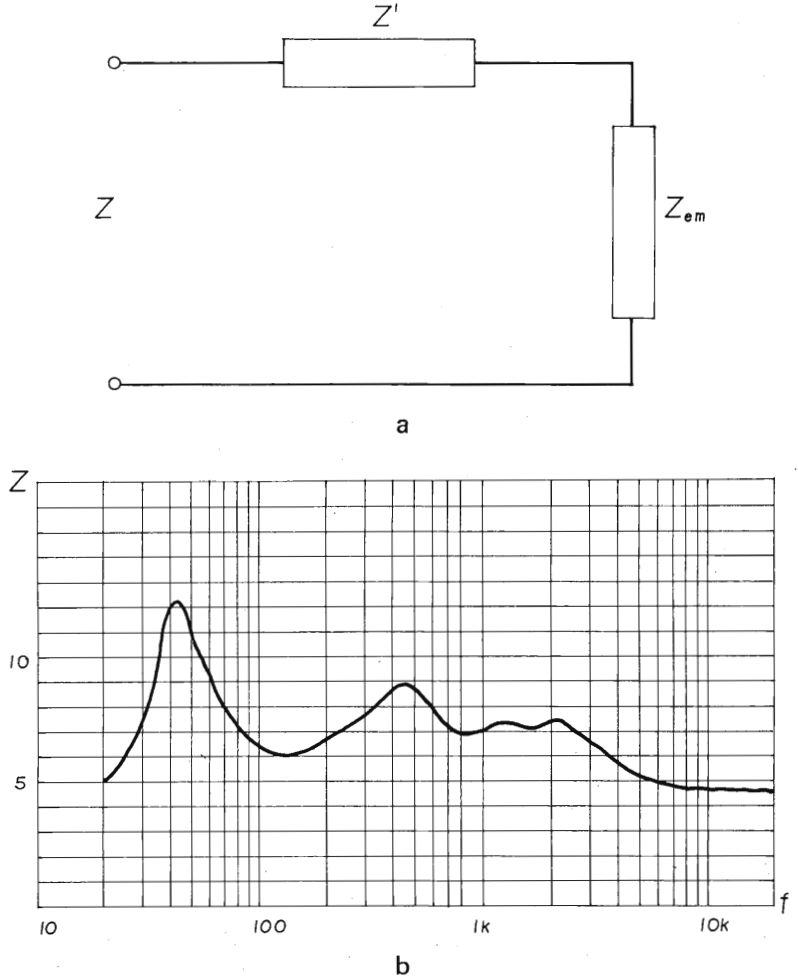


Fig. VIII.26 - Impedenza dell'altoparlante. a) *L'impedenza dell'altoparlante come serie dell'impedenza elettrica e dell'impedenza equivalente all'accoppiamento elettro-acustico;* b) *andamento dell'impedenza al variare della frequenza.*

pedenza dell'altoparlante è inferiore a quella prevista come carico dell'amplificatore, la corrente nell'amplificatore può superare valori tollerabili e quindi l'amplificatore, se a transistori, può essere danneggiato. Per quanto riguarda la connessione di più altoparlanti, si può supporre, per semplicità, che si tratti di resistenze collegate in serie o in parallelo; l'impedenza totale deve essere uguale a quella richiesta come carico dell'amplificatore. In fig. VIII.27 sono riportati

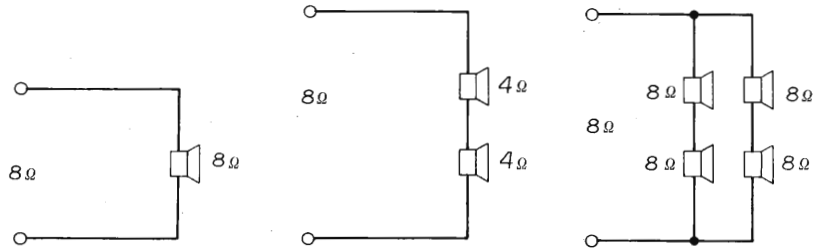


Fig. VIII.27 - Connessioni fra altoparlanti: impedenza complessiva.

alcuni esempi di connessioni di più altoparlanti e si è calcolata l'impedenza complessiva. Peraltro, sia nella connessione di altoparlante ed amplificatore, sia nei sistemi di più altoparlanti, si deve tenere presente che i risultati sono approssimati, date le caratteristiche dell'impedenza dell'altoparlante di cui si è parlato.

VIII.4. La cuffia

La cuffia è, come l'altoparlante, un trasduttore elettroacustico, che trasforma l'energia elettrica fornita dall'amplificatore finale in energia acustica. Malgrado le prestazioni offerte dalle cuffie non possano essere paragonate a quelle ottenibili con un impianto di altoparlanti, tuttavia la loro diffusione è crescente. In primo luogo le loro caratteristiche tecniche sono state notevolmente migliorate dalle case costruttrici, così da offrire, in certe realizzazioni, risultati molto buoni. In secondo luogo le cuffie, date le loro caratteristiche, soddisfano certe esigenze di ascolto, quali diversamente non si riuscirebbe a realizzare: ad esempio l'ascolto notturno e comunque nei casi in cui la riproduzione può disturbare chi sta nello stesso ambiente o in ambienti vicini. Infine la cuffia scherma l'ascoltatore dall'ambiente, impedendo che gli giungano rumori, che potrebbero rendere impossibile una buona audizione.

1) *Tipi di cuffie.*

Le cuffie possono essere: a ferro mobile, piezoelettriche, a bobina mobile, elettrostatiche.

Il tipo a ferro mobile è usato in telefonia, data la buona efficienza. Le sue prestazioni però sono di livello inferiore agli altri tipi, per cui in alta fedeltà non è usato.

La cuffia piezoelettrica si basa sull'effetto piezoelettrico di cui si è già parlato nel capitolo sui fonorivelatori: un segnale elettrico, applicato ad una piastrina di quarzo, la fa vibrare e le oscillazioni sono trasmesse all'aria circostante e all'orecchio.

Fig. VIII.28 - Esempio di cuffia (Grundig).

Le cuffie a bobina mobile ed elettrostatiche si basano sugli stessi principi dei corrispondenti altoparlanti; per il loro funzionamento si rimanda pertanto a quanto già detto al paragrafo VIII.1.

È importante il modo con cui il trasduttore è montato e si realizza il contatto con l'orecchio. Un esempio è riportato in fig. VIII.28.

Si devono considerare vari fattori: la pressione orecchio-aurico-

lare; la superficie di contatto; il volume della cavità determinatasi fra trasduttore e orecchio. Per quanto riguarda la pressione, essa deve essere tanto maggiore quanto più ampie sono le dimensioni dell'auricolare; essa è legata, d'altra parte, al comfort dell'ascolto, in quanto può rendere intollerabile all'ascoltatore il portarla per periodi prolungati di tempo.

La superficie di contatto può essere minima, come nel caso in cui l'auricolare è parzialmente inserito nella cavità dell'orecchio, oppure può comprendere l'intero orecchio.

La cavità che si viene a determinare fra trasduttore e orecchio è importante dal punto di vista delle caratteristiche elettroacustiche della cuffia; il suo volume può variare da pochi cm^3 ad alcune centinaia di cm^3 in corrispondenza dei casi, rispettivamente, di auricolare inserito parzialmente nell'orecchio e di auricolare che copre l'intero orecchio.

Gli auricolari possono essere del tipo chiuso o aperto. I primi isolano completamente dall'ambiente, con il vantaggio che l'ascoltatore non è disturbato da rumori esterni; si crea però un certo disagio nell'ascolto prolungato, in quanto in effetti l'ascoltatore non si trova in una situazione reale. Gli auricolari di tipo aperto sono invece realizzati con materiali che non isolano completamente dall'esterno; l'ascolto prolungato è più gradevole, però la qualità di riproduzione del suono è inferiore.

2) *Caratteristiche elettriche e acustiche.*

La pressione sonora è direttamente proporzionale all'area del diaframma e inversamente proporzionale al volume della cavità compresa fra diaframma e timpano; come ordine di grandezza si tenga presente che è sufficiente 1 mW di potenza elettrica a produrre una pressione di circa 110 dB in una cuffia in cui la cavità abbia un volume di circa 6 cm^3.

La sensibilità di una cuffia, cioè la capacità di rivelare segnali deboli, è data dai costruttori in diversi modi. Alcuni danno il valore della pressione acustica prodotta da un segnale di ingresso di una certa potenza (esempio: 1 mW per 110 dB); altri considerano la tensione applicata, ad una data frequenza, necessaria per ottenere una determinata pressione acustica (esempio: 0,28 V per 100 dB a 1 kHz).

La risonanza meccanica nelle cuffie, date le piccole dimensioni, si verifica alle alte frequenze audio. Il carico della cuffia è l'orecchio; esso può essere considerato equivalente, acusticamente, a una capacità in parallelo a una resistenza; il suo comportamento varia perciò con la frequenza: alle basse frequenze entra in gioco la resistenza e alle alte la risposta diminuisce a causa della presenza della

capacità. Vi è inoltre da tenere presente, sempre alle alte frequenze, che il canale dell'orecchio entra in risonanza: maggiore è la distanza fra diaframma e timpano e più bassa è la frequenza di risonanza.

Si hanno cuffie a bassa e ad alta impedenza. Le prime sono le più diffuse; il valore di impedenza è compreso tra 4 e 16 Ω. Si collegano all'uscita apposita dell'amplificatore finale; se le si inserisce al posto degli altoparlanti, occorre un circuito di adattamento, date le basse potenze richieste. Le cuffie ad alta impedenza hanno un valore di impedenza da alcune centinaia ad alcune migliaia di ohm; caricando poco l'amplificatore a cui sono collegate, presentano minori problemi di connessione.

Le proprietà della cuffia come schermo dai rumori dell'ambiente possono essere determinate considerando, al variare della frequenza, l'attenuazione prodotta dalla presenza della cuffia di un segnale proveniente, ad esempio, da un altoparlante; la misura può essere fatta considerando i livelli del segnale che si deve inviare all'altoparlante per avere la stessa intensità di ascolto, con e senza cuffia. L'attenuazione cresce al crescere dell'area di contatto, della pressione della cuffia sull'orecchio e del volume della cavità compresa.

Altri dati caratteristici sono: la potenza e la tensione massima ammesse; la risposta in frequenza; la distorsione. Per essi si rimanda a quanto già detto per gli altoparlanti.

CAPITOLO NONO

L'AMPLIFICATORE

In questo capitolo si prende in esame l'anello di amplificazione della catena Hi-Fi costituito dalle due sezioni: preamplificatore e amplificatore di potenza o amplificatore finale. Si premettono alcune considerazioni sul problema dell'adattamento fra fonorivelatore ed amplificatore e fra amplificatore ed altoparlante o diffusori acustici.

IX.1. L'adattamento

a) *Adattamento dei fonorivelatori.*

È stato già detto qual è il ruolo dell'amplificatore nella catena Hi-Fi. In questo paragrafo si vedrà in quale modo si deve eseguire l'adattamento del fonorivelatore e dell'altoparlante all'amplificatore. Collegando il fonorivelatore all'amplificatore, occorre far in modo di trasmettere la tensione da questo erogata senza indebolimenti e distorsioni; tale operazione è chiamata adattamento di tensione. Le condizioni di un buon adattamento vengono raggiunte quando il fonorivelatore vede l'amplificatore come una impedenza (impedenza di carico) il cui valore deve essere più di dieci volte superiore alla sua impedenza propria.

Esempio: impedenza fonorivelatore $Z_i = 3.420\ \Omega$ a 1.000 Hz;
impedenza di carico (amplificatore) Z_c, consigliata, compresa fra 47 e 70 kΩ.

Il fonorivelatore viene collegato all'amplificatore mediante un cavo che può alterare le condizioni ottimali d'adattamento, alterazione dipendente dalle caratteristiche elettriche del fonorivelatore.

Data l'influenza del cavo, questo non può essere costituito da una qualsiasi coppia di fili; in genere si utilizza un cavo coassiale con opportune caratteristiche elettriche. È importante considerare la lunghezza del cavo coassiale. Infatti un cavo coassiale sufficientemente lungo per non poter trascurare i suoi effetti reattivi, si comporta come una capacità in parallelo al fonorivelatore, con valore dell'ordine del centinaio di pF. Così un fonorivelatore con forti componenti induttive, quando è connesso con un cavo troppo lungo, si

comporta come una sorgente ideale a cui è applicato un filtro *passa basso* che attenua la risposta alle alte frequenze. In generale è consigliabile che la lunghezza del cavo coassiale sia intorno 1 metro.

b) *Adattamento dei diffusori.*

Rispetto ai diffusori, la funzione di sorgente viene esplicata dall'amplificatore e l'operazione di adattamento, adattamento di potenza, consiste nel trasferire al diffusore la potenza elettrica erogata dall'amplificatore senza indebolimenti e distorsioni. Le condizioni di un buon adattamento vengono raggiunte quando l'impedenza del diffusore (impedenza di carico) è uguale a quella della sorgente. In pratica, l'impedenza del diffusore varia, entro certi limiti, al variare della frequenza (vedi fig. VIII.26). Questo fatto non comporta apprezzabili perdite di potenza; possiamo così stabilire che le condizioni di un buon adattamento vengono raggiunte anche quando l'impedenza del diffusore varia nei limiti riportati in tabella.

Tabella IX.1

Valore nominale dell'impedenza	Limiti di variabilità dell'impedenza
4 Ω	da 2,5 Ω a 15 Ω
8 Ω	da 5 Ω a 20 Ω
16 Ω	da 8 Ω a 30 Ω

IX.2. Il preamplificatore

È stato chiamato in modo generico amplificatore l'elemento di amplificazione di un sistema di riproduzione Hi-Fi. L'amplificatore è però costituito da due sezioni: la sezione *amplificatore di tensione* o *preamplificatore* e la sezione *amplificatore di potenza* o *amplificatore finale.* Queste due parti possono essere realizzate o in un unico modulo o in moduli separati; nel primo caso si ottiene l'*amplificatore integrato*, nel secondo l'*amplificatore ad elementi separati* (fig. IX.1).

La realizzazione di un amplificatore integrato, in generale, è possibile per potenze erogate che non superino il centinaio di watt continui; oltre questi valori è consigliabile la realizzazione a componenti separati, a causa della adozione di idonei sistemi di raffreddamento dei circuiti finali di potenza.

a

b

Fig. IX.1 - a) Amplificatore integrato (Rotel); b) amplificatore ad elementi separati (Galactron).

Le funzioni del preamplificatore sono: trasferimento e amplificazione in tensione dei segnali delle diverse fonti in modo da pilotare l'amplificatore di potenza; possibilità di "manipolare" i segnali in arrivo dalle sorgenti in modo da ottenere all'uscita dell'altoparlante il segnale acustico che meglio si adatti all'ambiente d'ascolto. L'amplificazione dei segnali può avvenire in due modi: lineare e non lineare; l'amplificazione è lineare quando, qualunque siano le caratteristiche del segnale in tensione proveniente dalla sorgente, per esso si ha trasferimento e amplificazione che devono essere uguali per tutte le sue parti; l'amplificazione è non lineare quando si ha trasferimento con amplificazione variabile secondo le caratteristiche del segnale.

L'amplificazione non lineare avviene negli stadi d'ingresso del preamplificatore per i segnali provenienti dai fonorivelatori; in generale, a causa dei problemi di incisione dei dischi e delle caratteristiche dei fonorivelatori, l'amplificazione di tali segnali varia con la frequenza, come nel diagramma qui riportato (fig. IX.2).

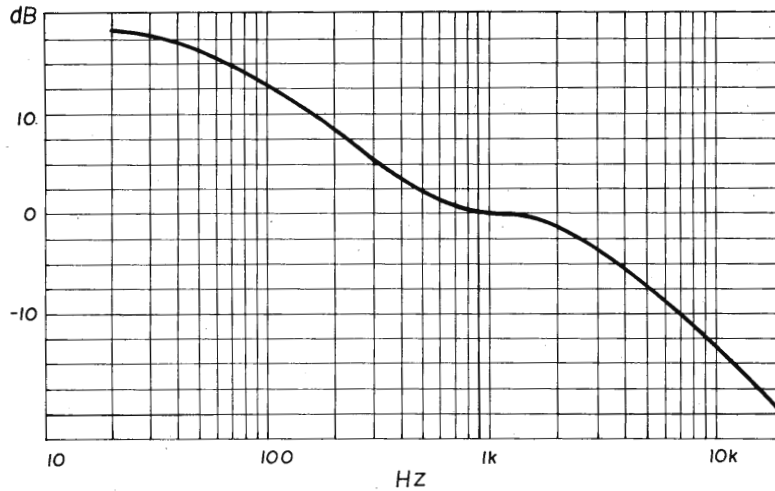


Fig. IX.2 - L'amplificazione non lineare del preamplificatore: equalizzazione RIAA.

Per ottenere delle buone prestazioni, un preamplificatore stereofonico dovrebbe essere così impostato: uno stadio d'ingresso capace di accettare segnali con diversa dinamica; una preregolazione di sensibilità in ingresso; due monitor per registratori (tape monitor); uno stadio di controllo di tono (meglio se uno stadio composto da

un equalizzatore d'ambiente); filtri passa basso e passa alto escludibili; controllo di volume generale con controllo fisiologico; controlli di livello indipendenti sui due canali d'uscita; possibilità di miscelazione dei due canali.

Per un esame dettagliato dividiamo il preamplificatore nelle sezioni: ingressi (IN), controlli, uscite (OUT). In figura IX.3 è riportato lo schema a blocchi di un solo canale.

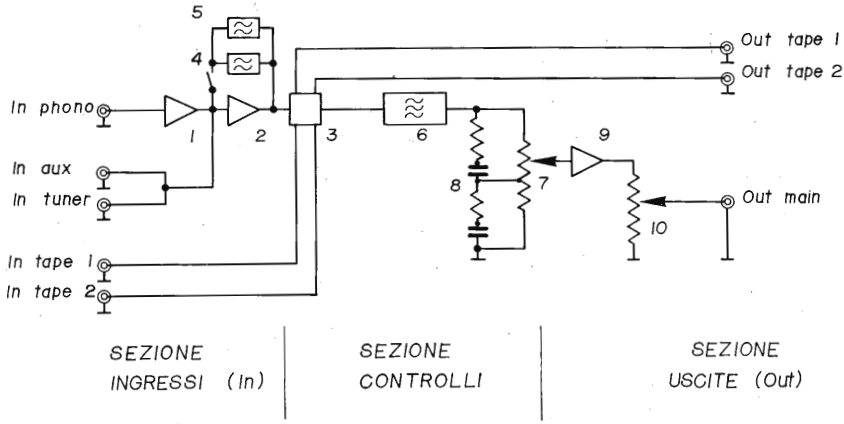


Fig. IX.3 - Schema a blocchi di un preamplificatore: 1) *Amplificatore d'ingresso RIAA;* 2) *amplificatore lineare di ingresso;* 3) *commutatore monitor;* 4) *filtro passa alto Rumble;* 5) *filtro passa basso Scratch;* 6) *controllo toni;* 7) *controllo volume;* 8) *controllo fisiologico del volume;* 9) *amplificatore lineare d'uscita;* 10) *bilanciamento.*

Lo stadio d'ingresso del preamplificatore 1, per i fonorivelatori, è costruito in modo che l'amplificazione vari con la frequenza; per questo viene chiamato *equalizzatore RIAA*; all'uscita dell'equalizzatore il segnale è stato reso uniforme (processo di equalizzazione) indipendentemente dalla frequenza.

L'ingresso fono può essere di due tipi: ingresso fono magnetico o a basso livello e ingresso fono piezoelettrico o ad alto livello. L'ingresso fono magnetico, che è quello più usato nella riproduzione Hi-Fi, ha dei circuiti che permettono l'adattamento con il fonorivelatore. Secondo le norme DIN, tale ingresso deve presentare un'impedenza di 47 kΩ o più, quando ad esso viene applicato un segnale di 1 kHz, la cui ampiezza è di almeno 5 mV. Per l'ingresso fonomagnetico, ha particolare importanza il valore di sensibilità; tale valore viene chiamato *sensibilità di ingresso fono.* Si definisce sensibilità di ingresso

fono la tensione di un segnale alla frequenza di 1 kHz che permette di avere all'uscita del preamplificatore la massima tensione indistorta, o all'uscita di un amplificatore integrato la massima potenza indistorta.

In questo primo stadio di amplificazione si producono il fruscio e la maggior parte del ronzio (da non confondere con i rumori prodotti dalla puntina del fonorivelatore che striscia sul disco), disturbi che sono evidenti quando si pone il comando del volume dell'amplificatore al massimo, e che si riducono in parte agendo in diminuzione su tale comando. Questa regolazione può essere eseguita solo dipendentemente dalla tensione d'ingresso prodotta dal fonorivelatore. Ad esempio, due amplificatori integrati che denunciano la stessa potenza massima d'uscita indistorta di 100 W differiscono, nell'erogare tale potenza, solo nel valore della tensione d'ingresso fono: hanno 1,5 mV uno e 5 mV l'altro di sensibilità di ingresso. Ad essi viene applicato un segnale di 1 kHz, di ampiezza 5,5 mV; per avere in uscita 100 W di potenza, nell'amplificatore con sensibilità 5 mV occorre tenere il comando di volume quasi al massimo, mentre nell'altro amplificatore, grazie alla migliore sensibilità d'ingresso, il regolatore del volume viene tenuto più chiuso; ciò comporta, a parità di volume sonoro, un'attenuazione del fruscio e del ronzio di un fattore pari al rapporto delle sensibilità d'ingresso, e cioè di 10,45 dB (20 Log 5 mV/1,5 mV).

Il confronto fra fruscio, ronzio (rumore) e segnale utile viene espresso con un rapporto detto *rapporto S/N,* rapporto segnale/rumore. Le norme DIN richiedono che il valore minimo di tale rapporto (non pesato) sia di 50 dB alla tensione d'ingresso nominale. È stato usato il termine pesato; in generale, quando compare, questo termine significa che le misure sono state fatte tenendo conto della sensibilità dell'orecchio, che come è stato detto è diversa alle varie frequenze. Il valore S/N pesato è superiore al rapporto S/N semplice. Ad esempio: con una sensibilità fono di 1,8 mV ad un rapporto S/N semplice di 62 dB corrisponde un rapporto S/N pesato di 71 dB. Si tenga presente che queste misure dipendono dalla posizione dei controlli di tono e del volume e dall'impedenza su cui viene chiuso l'amplificatore; secondo le norme DIN le misure sui preamplificatori vengono eseguite con una impedenza di carico di 4,7 kΩ, con i controlli di tono in posizione lineare flat e il controllo di volume in posizione di massimo.

Altre caratteristiche riferite allo stadio d'ingresso sono la dinamica e la precisione della risposta di equalizzazione RIAA.

La dinamica corrisponde al rapporto fra la tensione massima che si può applicare al preamplificatore, senza che le distorsioni lineari superino una certa entità, e la tensione minima che deve essere

superiore, ad esempio di mille volte, alla tensione di rumore; tale valore è espresso in dB. Ad esempio, un preamplificatore con una tensione massima, applicabile all'ingresso, di 77,5 mV e tensione minima di 0,775 mV, ha una dinamica di 40 dB. Le norme DIN richiedono una dinamica di almeno 20 dB.

La precisione di risposta di equalizzazione RIAA dà l'idea della precisione con cui equalizza lo stadio. Le norme DIN richiedono una precisione minima di $\pm$ 2 dB.

Sempre con riferimento alla fig. IX.3, gli stadi successivi sono costituiti da un commutatore monitor 3 a cui si collega il registratore e da un amplificatore lineare 2 a cui, mediante opportuno adattamento, vengono applicati dall'esterno i segnali delle sorgenti sonore quali sintonizzatori (Tuner) e ingressi ausiliari. In questo stadio sono presenti anche due tipi di filtro: il filtro passa basso 5 e il filtro passa alto 4; tali filtri sono disinseribili.

Il filtro passa basso, detto anche *scratch,* serve per eliminare i fastidiosi disturbi di alta frequenza, scricchiolii e fruscii dovuti alle imperfezioni delle sorgenti (i dischi, i nastri); tale filtro può avere una frequenza di taglio a 5 kHz o a 10 kHz ed una pendenza di 6 dB/ott. o di 12 dB/ott. o di 24 dB/ott. (fig. IX.4 a).

Il filtro passa alto, detto anche *rumble,* serve per eliminare i disturbi di bassa frequenza, intorno ai 50 Hz, generati dalle fluttuazioni del piatto del giradischi; tale filtro ha una frequenza di taglio a 50 Hz o a 100 Hz ed una pendenza di 6 dB/ott. o 12 dB/ott. o 24 dB/ott. (fig. IX.4 b).

L'inserzione dei filtri descritti altera la risposta in frequenza dell'amplificatore, lasciando inalterata solo una parte della banda di frequenza; la banda sarà più o meno ampia secondo la scelta delle frequenze di taglio, e l'effetto dei filtri sarà più o meno evidente secondo la pendenza. Ad esempio, filtri a 6 dB/ott. sono efficaci solo se le frequenze di taglio di rumble e scratch sono 100 Hz e 5.000 Hz rispettivamente; ciò comporta una banda compresa fra 100 e 5.000 Hz, quindi non sono utilizzabili per apparati Hi-Fi. I filtri a 24 dB/ott. invece permettono di spostare le frequenze di taglio a 50 Hz e a 10 kHz, rispettivamente, lasciando abbastanza inalterata la banda e attenuando le frequenze indesiderate. Solo i filtri a 12 dB/ott. e quelli a 24 dB/ott. sono usati in apparati Hi-Fi.

I rimanenti stadi sono costituiti: dal controllo dei toni 6, dal controllo del volume 7, dal controllo fisiologico del volume 8, dall'amplificatore lineare di uscita 9 e dal bilanciamento 10.

Un gran numero di amplificatori sono provvisti dei controlli dei toni bassi *(Bass)* e dei toni alti *(Treble);* solo alcuni posseggono tre, quattro o cinque controlli di tono realizzati su altrettante frequenze

della banda audio; pochi hanno incorporato un controllo di tonalità costituito da un equalizzatore ambientale *(Graphic-Equalizer).*

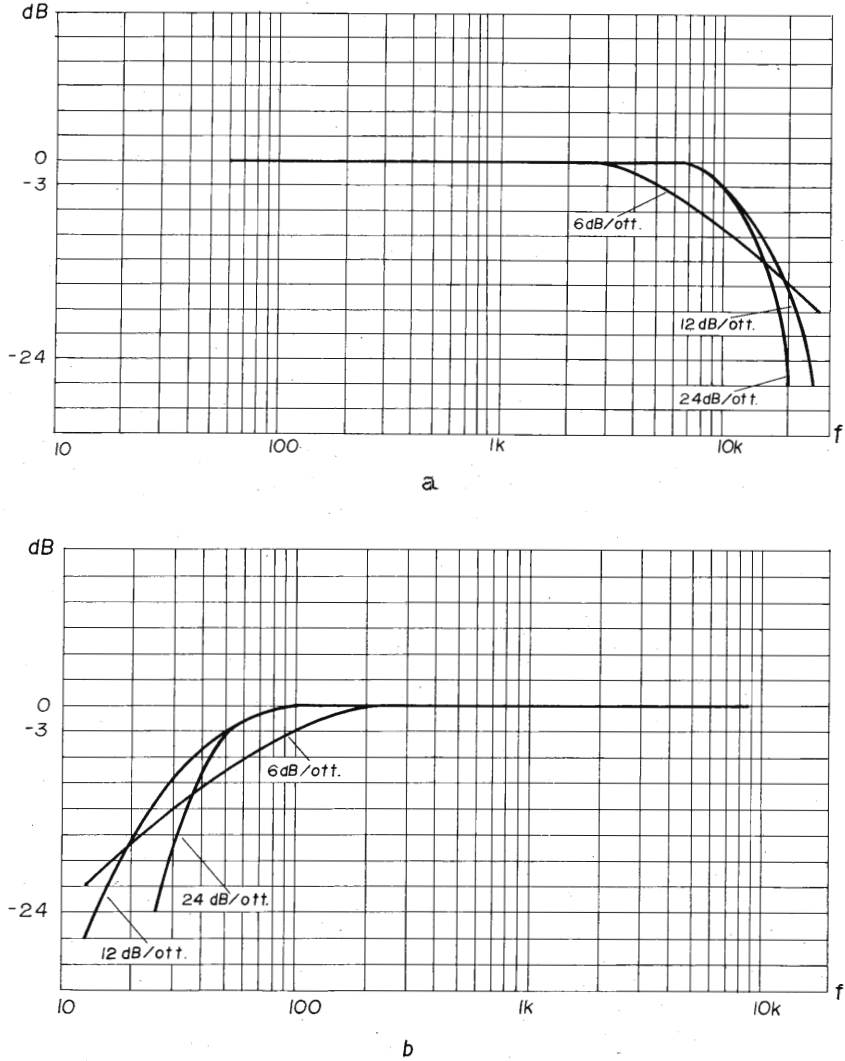


Fig. IX.4 - a) *Curva di risposta del filtro passa basso (scratch);* b) *curva di risposta del filtro passa alto (rumble).*

I controlli di tono, bassi e alti, operano come dei filtri che possono esaltare o attenuare sia la banda delle frequenze basse sia quella delle alte, come illustrato in fig. IX.5.

L'uso di questi controlli non permette un corretto adeguamento del segnale all'ambiente d'ascolto; essi servono solo ad alterare il segnale in modo da rendere i suoni cupi o brillanti.

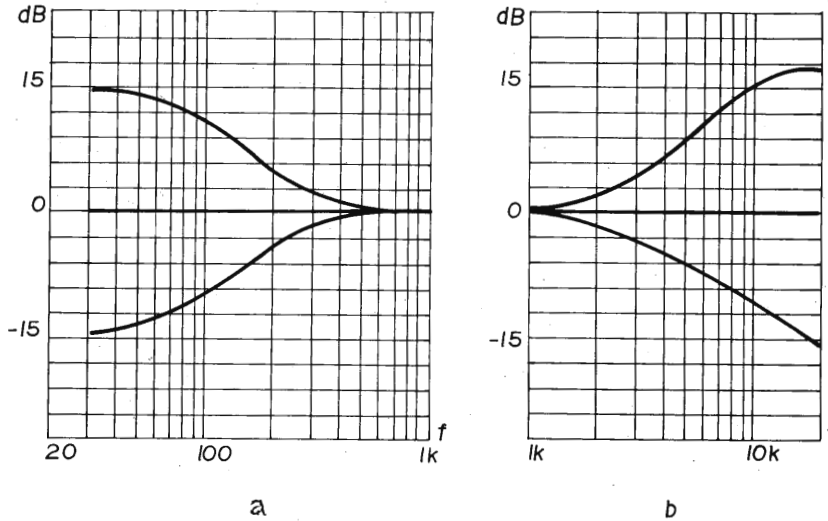


Fig. IX.5 - L'attenuazione e l'esaltazione delle frequenze alte (b) *e basse* (a) *prodotte dai controlli di tono.*

Se si vuole un adattamento del suono riprodotto all'acustica del locale di ascolto, occorre che l'amplificatore sia dotato dell'equalizzatore d'ambiente con frequenze spaziate almeno di un'ottava, meglio se spaziate di 1/3 d'ottava.

Non si confonda un equalizzatore d'ambiente con i controlli di tono realizzati su tre, quattro o cinque frequenze; il primo, come si è detto, è un dispositivo che permette di adattare i suoni riprodotti all'acustica dell'ambiente, mentre i secondi servono ad alterare in modo più sofisticato i suoni ed ottenere degli effetti, ma non sono in grado di equalizzare un ambiente.

Un equalizzatore d'ambiente è realizzato con uno stadio comprendente un amplificatore ed una opportuna rete resistiva, induttiva e capacitiva a parametri variabili.

Quando i cursori sono posti in posizione centrale, l'equalizzatore si comporta da semplice elemento di trasmissione, mentre si comporta come un filtro passa alto, o passa basso, o passa banda per tutte le altre posizioni.

Il filtro di un buon equalizzatore ad ottava agisce di $\pm$ 16 dB per ciascuna delle dieci frequenze d'ottava comprese fra 32 e 16 kHz.

Il comando di bilanciamento 10 permette di rendere in modo corretto l'effetto stereofonico, regolando il livello d'uscita sonora dei due canali. Il comando di volume 7, con il controllo fisiologico 8, è composto da una rete resistiva capacitiva. Il controllo fisiologico può essere inserito o disinserito a comando; in generale viene utilizzato quando si ascolta a bassi livelli sonori.

Infine si ha lo stadio d'uscita 9 costituito da un amplificatore lineare che amplifica, in generale, di dieci volte (20 dB) il segnale proveniente dagli altri stadi e li adatta all'amplificatore di potenza.

IX.3. L'amplificatore di potenza

Se per la maggior parte dei preamplificatori le misure standard sono sufficienti e necessarie per definire la qualità dell'apparecchiatura, non altrettanto si può dire per gli amplificatori di potenza.

Un esempio permetterà di chiarire quanto asserito. La misura standard della potenza d'uscita di un amplificatore di potenza si effettua realizzando lo schema riportato in fig. IX.6.

La potenza audio sul carico fittizio (resistenza pura) viene calcolata mediante la relazione V^2/R con V tensione efficace ai capi della resistenza di carico; la potenza misurata è la potenza media espressa in watt (rms); rms significa root mean square, cioè radice quadrata del valore quadratico medio.

Nella riproduzione del suono invece, all'amplificatore viene collegato un altoparlante o un sistema di altoparlanti che non si comportano come una resistenza pura ma come una impedenza, la quale a sua volta, come è stato detto, varia col variare della frequenza; di conseguenza un amplificatore, costruito per erogare una certa potenza su un carico resistivo, su un carico reale rappresentato da una impedenza con la stessa componente resistiva eroga una potenza utile per il suono inferiore.

In pratica, nessun valore di potenza dell'amplificatore ottenuto con misure su un carico resistivo è valido quando all'uscita dello stesso si colleghi un altoparlante o un carico fittizio costituito da una resistenza, un condensatore e una induttanza. La misura di potenza su carico resistivo ha la sua importanza, come si vedrà, se oltre a considerare la capacità dell'amplificatore di erogare energia

nell'unità di tempo si considera anche la sua capacità di riprodurre suoni quanto più esenti da distorsioni.

In definitiva, un amplificatore di potenza Hi-Fi, per essere considerato tale, deve erogare la quantità di potenza indistorta sufficiente per qualunque uso di riproduzione sonora.

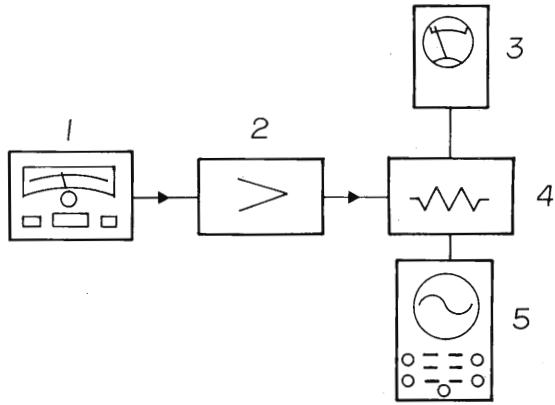


Fig. IX.6 - Schema di misura della potenza d'uscita di un amplificatore di potenza: 1) *generatore di segnali audio;* 2) *amplificatore in prova;* 3) *voltmetro;* 4) *carico fittizio;* 5) *oscilloscopio che permette di controllare la tensione di uscita.*

Per quanto riguarda le distorsioni, il basso valore di queste non sempre contraddistingue qualitativamente l'unità di potenza; sino ad oggi non è ancora stato stabilito quell'insieme di parametri che permettano di decidere in modo univoco la precisione della coppia amplificatore di potenza e diffusore nel restituire le caratteristiche timbriche e dinamiche del suono.

Le caratteristiche dell'amplificatore di potenza si possono dividere in due categorie: le primarie, che definiscono le condizioni necessarie per una buona riproduzione sonora, e le secondarie, che non incidono molto sulla riproduzione.

Sono caratteristiche primarie: la distorsione di frequenza, la distorsione armonica, la distorsione d'intermodulazione, la distorsione di intermodulazione dinamica dovuta ai transitori, la distorsione d'incrocio, il rapporto segnale/rumore.

Sono caratteristiche secondarie: la sensibilità, l'impedenza d'ingresso, il fattore di smorzamento, la distorsione di fase.

Premessa una breve analisi delle caratteristiche secondarie, il resto del capitolo è dedicato all'esame delle caratteristiche primarie.

1) *Le caratteristiche secondarie.*

Sensibilità e impedenza d'ingresso.

La sensibilità esprime il valore in tensione da applicare all'amplificatore affinché questi eroghi, su carico resistivo, la massima potenza entro un fissato tasso di distorsione. I valori correnti di sensibilità sono compresi fra 0,5 e 2 V, mentre per l'impedenza d'ingresso si hanno valori compresi tra 5.000 e 250.000 Ω. In generale, mentre un amplificatore con una sensibilità di 1,2 V ed una impedenza d'ingresso di 100 kΩ può essere collegato a qualunque preamplificatore, un altro, con sensibilità di 2 V e una impedenza d'ingresso di 5.000 Ω, deve essere collegato ad un preamplificatore capace di erogare una tensione così elevata su una impedenza relativamente bassa, prerogative che possono mancare in qualche preamplificatore.

Fattore di smorzamento.

Un amplificatore di potenza collegato ad un altoparlante con impedenza Z_c può essere schematizzato mediante un generatore equivalente che eroga una tensione E_u con in serie un'impedenza Z_u impedenza d'uscita dell'amplificatore, vedi fig. IX.7. La tensione del

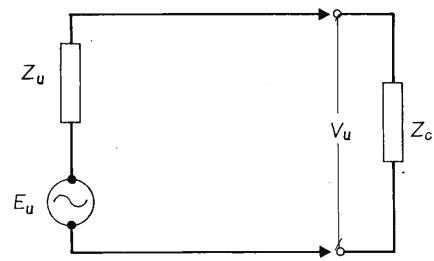


Fig. IX.7 - Schematizzazione del collegamento amplificatore-altoparlante.

generatore equivalente dipende dal segnale proveniente dal preamplificatore.

A causa della presenza della impedenza Z_u la tensione V_u ai capi dell'altoparlante sarà inferiore a E_u. Il fattore di smorzamento viene definito da

$$F = \frac{V_u}{E_u - V_u} = \frac{Z_c}{Z_u} \qquad (1)$$

Così, un amplificatore con resistenza interna pari a 0,05 Ω collegato ad un altoparlante con impedenza nominale di 8 Ω presenta un fattore di smorzamento $F = 160$.

I costruttori di amplificatori utilizzano la relazione (1) per denunciare il fattore di smorzamento delle loro apparecchiature. In pratica però, bisogna dare una corretta interpretazione di questo dato. Infatti, per semplicità, si supponga che il generatore equivalente dell'amplificatore, riportato in fig. IX.7, eroghi la tensione continua il cui andamento è riportato in fig. IX.8 a.

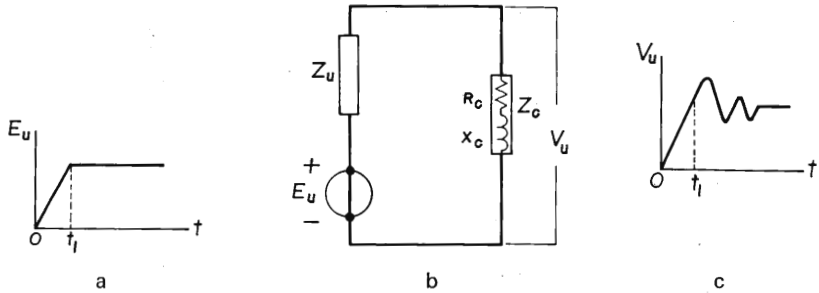


Fig. IX.8 - Fattore di smorzamento. a) *Tensione applicata dall'amplificatore all'altoparlante;* b) *schematizzazione di amplificatore e altoparlante;* c) *differenza di potenziale ai capi della bobina mobile; si noti la presenza di oscillazioni.*

Un tale segnale è applicato all'altoparlante, raffigurato dalla impedenza Z_c, formata da una resistenza e da una induttanza (fig. IX.8 b). Applicato il segnale, il cono dell'altoparlante viene spostato dalla sua posizione di riposo e portato in avanti o indietro di una certa misura. All'istante t_1, appena cessata la variazione, la membrana dell'altoparlante non si blocca ma, a causa della sua inerzia meccanica, continua ad oscillare avanti e indietro per un certo tempo. Le oscillazioni meccaniche fanno sì che ai due capi della bobina dell'altoparlante vi sia una differenza di potenziale variabile, come illustrato in fig. IX.8 c. Sono questi tipi di oscillazioni che danno luogo a cattive riproduzioni sonore; quindi occorre smorzarle il più rapidamente possibile. L'unico mezzo per frenare le oscillazioni, in modo che l'altoparlante compia solo quei movimenti che impone l'amplificatore e non altri, è quello di cortocircuitare la bobina dell'altoparlante, o meglio, cortocircuitare la componente induttiva della bobina, realizzando la condizione $R_c + Z_u = 0$; condizione irrealizzabile, poiché, mentre si può rendere Z_u piccolo, il valore minimo che può raggiungere R_c

è quello della resistenza in corrente continua della bobina stessa. Nell'esempio, assumendo che la resistenza in corrente continua sia di 6,6 Ω, $R_c + Z_u$ sarà maggiore o al più uguale a 6,6 Ω, comunque si vari Z_u. In pratica, la relazione (1) conviene sia modificata con

$$F = \frac{Z_c}{Z_u + R_c}$$

Nella tabella sono riportati i valori di F pratici e teorici di amplificatori collegati ad un altoparlante con impedenza nominale di 8 Ω e resistenza della bobina di 6,6 Ω.

Tabella IX.2

Impedenza interna dell'amplificatore (Z_u)	F teorico $\frac{Z_c}{Z_u}$	F pratico $\frac{Z_c}{Z_u + R_c}$
8 Ω	1	0,55
4 Ω	2	0,75
2 Ω	4	0,92
1 Ω	8	1,04
0,5 Ω	16	1,12
0,25 Ω	32	1,16
0,05 Ω	160	1,19
0,01 Ω	800	1,20
0,001 Ω	8.000	1,20

Le norme DIN fissano un valore teorico F pari a 3, valore assai basso. Un fattore di smorzamento teorico pari a 80 è più che sufficiente per controllare le oscillazioni della membrana dell'altoparlante.

La distorsione di fase.

Per la musica riprodotta non è stato ancora stabilito quanto la distorsione di fase determini la somiglianza fra suono reale e suono riprodotto; così, per il momento, si considera il valore di tale distorsione come secondario.

La risposta alla fase dell'amplificatore è legata alla risposta in frequenza, poiché quando diminuisce l'amplificazione a certe frequenze si producono contemporaneamente sfasamenti.

La distorsione di fase si rivela analizzando il tetto dell'onda quadra come riportato in fig. IX.9.

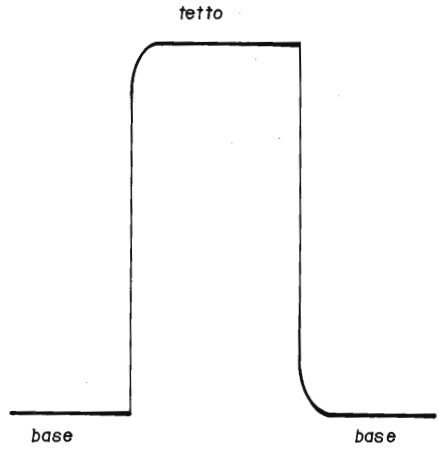


Fig. IX.9 a) - Onda quadra di 1.000 Hz all'uscita di un amplificatore con larghezza di banda di 35 kHz.

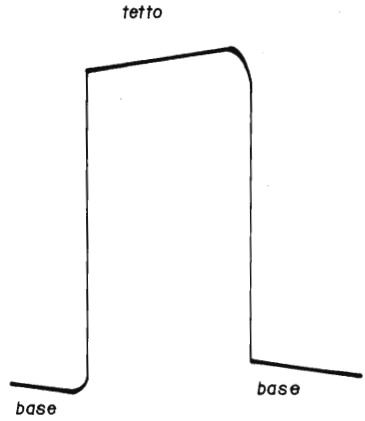


Fig. IX.9 b) - Onda quadra di frequenza 100 Hz. Il tetto inclinato verso l'alto (e la base inclinata verso il basso) denuncia risposta in fase ritardata alle basse frequenze ed esaltazione dei bassi.

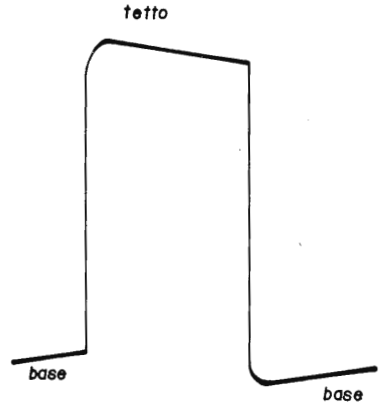


Fig. IX.9 c) - Onda quadra di frequenza 100 Hz. Il tetto inclinato verso il basso (e la base inclinata verso l'alto) denuncia risposta in fase anticipata alle frequenze basse ed attenuazione dei bassi.

2) *Le caratteristiche primarie.*

Si considerano ora le caratteristiche primarie necessarie per stabilire se un amplificatore appartenga alla categoria Hi-Fi. Per comprendere queste caratteristiche bisogna definire cosa si intende per distorsione.

La distorsione consiste in un complesso di deformazioni che il segnale elettrico costituente l'informazione subisce all'interno dell'amplificatore.

La distorsione di frequenza.

Si dice che un amplificatore non distorce in frequenza quando amplifica allo stesso modo tutte le frequenze dello spettro acustico. Questo fatto viene espresso con il diagramma di fig. IX.10.

Sempre in relazione alla fig. IX.10, si definisce larghezza di banda l'intervallo compreso tra le due frequenze alle quali l'amplificazione scende a 0,707 volte il valore che ha a 1.000 Hz; la diminuzione corrisponde a 3 dB. La larghezza di banda B è legata alla corretta riproduzione dei transitori d'attacco del suono. La relazione

$$B = \frac{0{,}35}{T_s} \qquad (2)$$

dove T_s rappresenta il tempo di salita, utilizzata con un segnale ad onda quadra, fig. IX.11, permette lo studio della risposta dell'amplificatore ai transitori.

La rapidità dei fronti di salita denuncia la qualità di riproduzione degli attacchi degli strumenti musicali, mentre il tetto dell'onda quadra rappresenta il comportamento dell'amplificatore alle frequenze basse e medie. Si chiama tempo di salita, T_s, il tempo che la forma d'onda impiega a passare dal valore 0,10 dell'ampiezza al valore 0,90 della medesima. Dato che l'orecchio ha una larghezza di banda di circa 20 kHz, dalla relazione (2) si deduce che il più rapido transitorio che può essere direttamente recepito ha un tempo di salita di circa 18 μs. Se all'orecchio si facesse giungere un segnale con tempo di salita minore, esso lo apprezzerebbe come un tempo di salita di 18 μs; questa situazione è confermata da esperienze di laboratorio.

La risposta alle onde sinusoidali e la risposta ai transitori non sono, quindi, cose separate; un amplificatore che abbia un tempo di salita minore di 18 μs non apporta alcun miglioramento, in fase d'ascolto, alla riproduzione dei transitori. Così, in pratica, gli amplificatori di potenza con bande di 200 kHz e più utilizzano tali bande per intervenire su tipi di distorsioni diversi dalle distorsioni di frequenza.

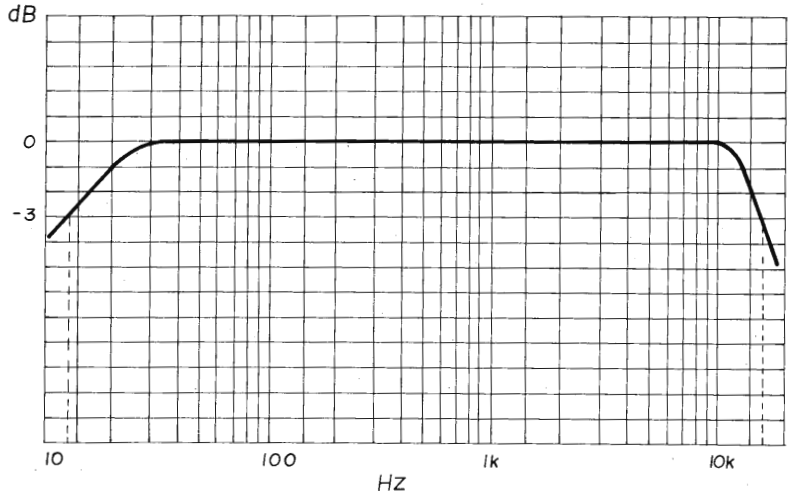


Fig. IX.10 - Curva di risposta di un amplificatore.

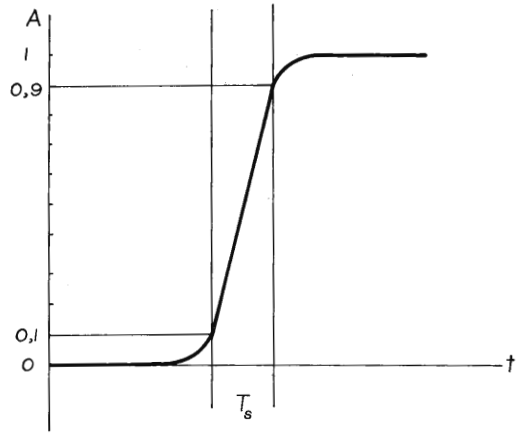


Fig. IX.11 - Onda quadra, con particolare riferimento al tempo di salita.

La distorsione armonica.

Il compito di un amplificatore è quello di amplificare i segnali elettrici senza apportare alcuna distorsione, come illustrato in figura IX.12.

Nell'esempio di figura, in cui il segnale in ingresso è sinusoidale, si nota che il fattore di amplificazione *A* rimane costante nell'intervallo di tempo compreso tra 0 e *T* quando non si hanno distorsioni.

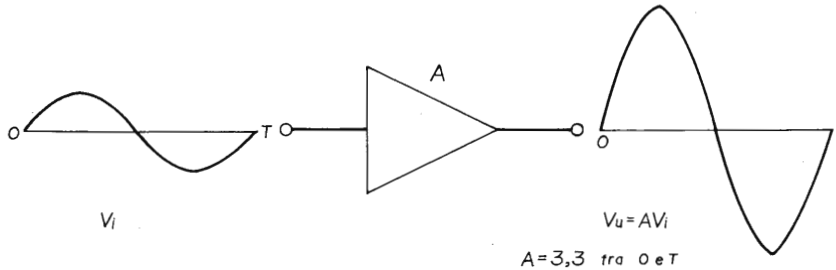


Fig. IX.12 - Tensione di ingresso e di uscita di un amplificatore ideale.

Si ha invece distorsione armonica continua del medesimo segnale quando il fattore di amplificazione dell'amplificatore subisce delle variazioni continue fra 0 e *T*, cioè per tutta la durata del ciclo (figura IX.13 a); il segnale in uscita non è più una sinusoide.

La distorsione armonica continua di un amplificatore, a cui è stato applicato un carico resistivo, è denunciata mediante un valore percentuale; il limite di udibilità della distorsione armonica, per un segnale sinusoidale, lo si ha quando questa è compresa fra l'1 % e il 2 %, mentre per un programma musicale la percentuale sale al 3-4 %. Le distorsioni dovute alla presenza preponderante di 2ª armonica danno luogo a suoni piacevoli; al contrario, le distorsioni di 3ª armonica danno luogo a suoni striduli e fastidiosi.

Tenuto conto che normalmente gli amplificatori producono minime quantità di 4ª e 5ª armonica, si può dire che la 3ª armonica è l'unica che quando supera l'1 % rende il suono sgradevole.

Se il fattore di amplificazione varia solamente in una ben determinata zona del segnale, come illustrato in fig. IX.13 b, si ha allora distorsione armonica di tipo impulsivo.

Per l'orecchio, le distorsioni armoniche di tipo impulsivo sono più fastidiose delle distorsioni armoniche continue.

La distorsione da *clipping*, è un tipo di distorsione impulsiva che si manifesta maggiormente negli amplificatori a transistori. In questi amplificatori, quando la tensione della forma d'onda in uscita raggiunge il massimo valore ammesso dal circuito, il transistore, a cui è applicato il segnale, non amplifica oltre e taglia bruscamente i valori di tensione superiori (fenomeno di clipping), come illustrato in

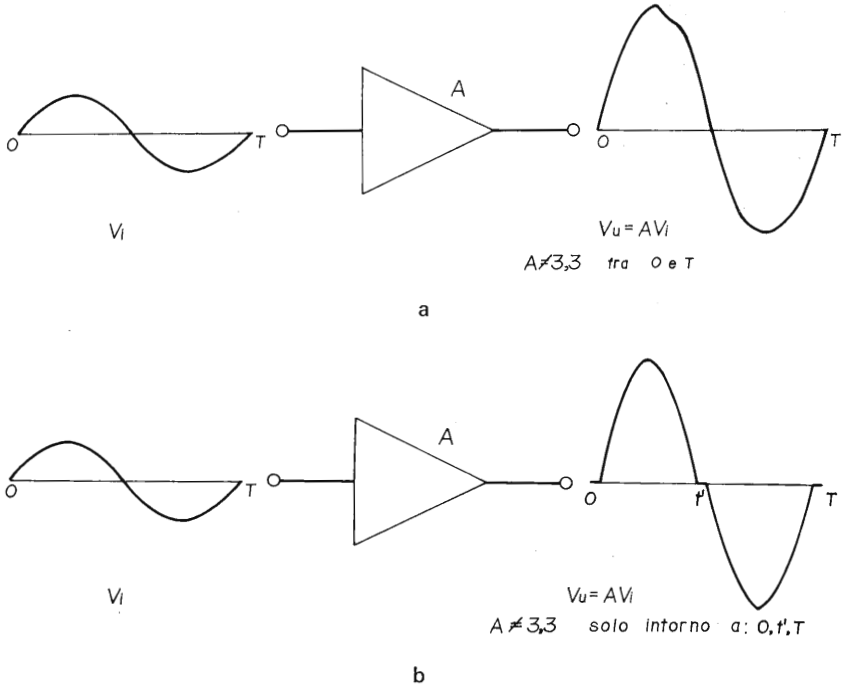


Fig. IX.13 - La distorsione armonica, continua (a) *e di tipo impulsivo* (b).

fig. IX.14, dove, come si vede, il clipping è avvenuto su tutte e due le semionde rendendo il segnale simile ad un'onda quadra, con un contenuto consistente di 3ª armonica.

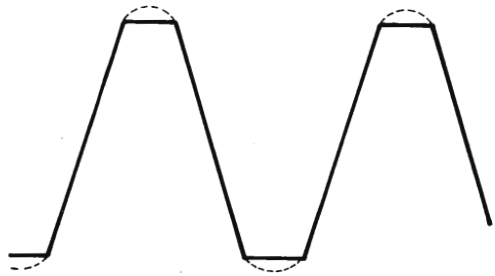


Fig. IX.14 - Onda clippata. La si può avere all'uscita di un amplificatore quando il segnale di ingresso supera il valore massimo ammesso.

L'andamento della distorsione armonica totale per gli amplificatori a transistori e a tubi è riportato in fig. IX.15.

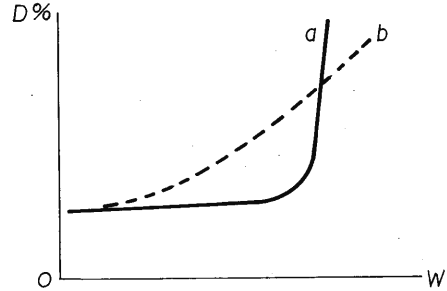


Fig. IX.15 - Diagramma della distorsione armonica in funzione della potenza d'uscita nel caso di amplificatore a transistori (a) *e a tubi* (b).

La distorsione d'intermodulazione e la distorsione d'intermodulazione dinamica (TIM).

Si ha distorsione d'intermodulazione quando all'ingresso dell'amplificatore si applicano due segnali sinusoidali, per esempio di frequenza 150 Hz uno e 7.000 Hz l'altro, e, analizzando il segnale in uscita, si trovano non solo le due sinusoidi, ma anche una serie di segnali di frequenza superiore e inferiore a quella massima della coppia d'entrata, le cui ampiezze sono tanto minori quanto maggiore è la deviazione da 7.000 Hz; in questo caso i segnali hanno le seguenti frequenze: 7.000 $\pm$ 150 Hz; 7.000 $\pm$ 2 $\times$ 150 Hz; 7.000 $\pm$ 3 $\times$ 150 Hz; eccetera.

Se si esegue il rapporto tra la radice quadrata della somma geometrica (cioè dei quadrati) delle ampiezze delle frequenze supplementari e l'ampiezza del segnale sinusoidale fondamentale a frequenza superiore (7.000 Hz nell'esempio riportato), si ottiene il fattore di intermodulazione.

Secondo le norme DIN, la misura dell'intermodulazione va eseguita prendendo l'ampiezza del segnale fondamentale di frequenza inferiore quattro volte maggiore del segnale fondamentale di frequenza superiore, ottenendo così un rapporto d'ampiezza 4 : 1.

Le norme DIN stabiliscono un valore massimo dell'intermodulazione pari al 3 % per la coppia di frequenza 250-8.000 Hz, con rapporto d'ampiezza 4 : 1.

Come si vede, l'intermodulazione è una misura dei prodotti di mescolamento (modulazione) generati nell'amplificatore quando ad esso vengono applicati segnali a regime permanente.

Un altro tipo di distorsione che si manifesta con l'effetto di modulazione è la distorsione d'intermodulazione dinamica (TIM) dovuta al tempo di transito dei segnali nell'amplificatore. Negli amplificatori nei quali si manifesta questo tipo di distorsione si ha all'ingresso un transitorio con altri segnali a frequenza diversa ma a regime permanente; l'effetto che si genera è una intermodulazione che può raggiungere valori del 100 % per brevi periodi.

Dato che i segnali musicali sono composti da transitori in presenza di frequenze a regime permanente, la distorsione TIM acquista un'importanza considerevole; un valore dell'1 % di TIM caratterizza già un amplificatore di classe scadente; invece la distorsione d'intermodulazione a regime permanente ricopre un ruolo meno importante per quanto riguarda i suoni musicali.

È importante notare che tra intermodulazione in regime permanente e la distorsione TIM non esiste alcuna correlazione, anche se in entrambe è presente il fenomeno di modulazione; così si possono avere amplificatori affetti da tassi di TIM molto elevati con tassi di distorsione di intermodulazione inferiori allo 0,01 %.

La distorsione d'incrocio.

Se si esegue la misura di distorsione armonica per potenze comprese fra quelle nominali ed un watt, quasi tutti gli amplificatori, anche i più economici, denunciano un tasso di distorsione armonica al disotto dei limiti praticamente udibili; ma se si scende a valori di qualche milliwatt, molti amplificatori denunciano tassi di distorsione armonica elevati. Questa distorsione è dovuta agli stadi finali dell'amplificatore e il segnale in uscita distorto ha la forma rappresentata in fig. IX.16. Essa si presenta a bassi livelli di potenza, è di tipo armonico impulsivo ed è chiamata distorsione di incrocio.

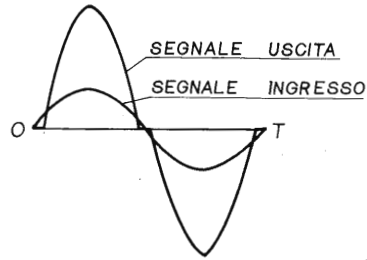


Fig. IX.16 - Segnale d'uscita di un amplificatore che presenta distorsione di incrocio.

Per ragioni circuitali, come ad esempio un errato dimensionamento del sistema di raffreddamento dei transistori finali, e per la natura fisica degli stessi transistori, la distorsione d'incrocio si manifesta in modo accentuato alle basse e medie potenze sonore.

Dato che la maggior parte della musica riprodotta richiede millesimi di watt, un amplificatore che denuncia alti valori di distorsione d'incrocio produce suoni sgradevoli.

Per rendersi conto delle potenze elettriche in gioco nelle riproduzioni musicali, si consideri un locale d'ascolto di 100 m^3 di volume e un tempo di riverberazione di 0,5 s; supponendo che in esso vi sia un rumore di fondo di 45 dB, valore tipico per un normale appartamento cittadino, il livello sonoro del più basso segnale musicale deve essere di 56 dB, in modo da essere udito chiaramente. Mediante la relazione:

$$P_a = 160 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{T}$$

dove P_a è la potenza acustica, V è il volume dell'ambiente, T è il tempo di riverberazione, si può determinare il valore della potenza acustica. Con i dati dell'esempio si ha $P_a = 3{,}2 \times 10^{-6}$ W (3,2 microwatt).

Considerando che nell'ambiente operi un diffusore acustico avente un'efficienza dell'1 %, l'amplificatore deve erogare una potenza elettrica di 0,32 mW.

Se lo stesso ragionamento viene fatto per un livello sonoro di 86 dB, corrispondente ad un ascolto medio, la potenza elettrica erogata sale a 0,32 W; mentre per un livello sonoro di 106 dB, corrispondente a un forte orchestrale, la potenza elettrica erogata è di 32 W. Da notare infine che la distorsione d'incrocio si rende più evidente all'ascolto per frequenze superiori a 1.000 Hz, dando luogo a un suono metallico e stridente, poiché agisce proprio nella banda di frequenze determinante per la timbrica del suono.

Il rapporto segnale rumore.

Il confronto fra rumore e segnale utile d'ingresso viene espresso mediante il rapporto *S/N,* nello stesso modo di cui si è parlato nel paragrafo del preamplificatore, solo che in questo caso per amplificatori la cui potenza nominale è minore o uguale a 20 W, il valore minimo di 50 dB, secondo le norme DIN, è riferito a una potenza di uscita di 100 mW; se l'amplificatore eroga più di 20 W tale valore aumenterà in proporzione.

3) *La stabilità negli amplificatori di potenza.*

Tutte le caratteristiche sin qui descritte sono state espresse con misure eseguite su carico resistivo ed esse permettono il confronto qualitativo fra amplificatori che erogano la medesima potenza nominale. Come è stato più volte detto, un amplificatore nel suo uso normale è collegato ad un carico reattivo che, dipendentemente dal circuito dell'amplificatore, provoca delle instabilità non richieste. Per poter evidenziare mediante un diagramma il fenomeno e permettere confronti fra vari apparecchi, si usa alimentare l'ingresso dell'amplificatore con un segnale ad onda quadra a frequenza appartenente ai toni acuti, e applicare all'amplificatore un carico reattivo puro costituito da un condensatore; infine si esaminano le eventuali sovraoscillazioni presenti, vedi fig. IX.17.

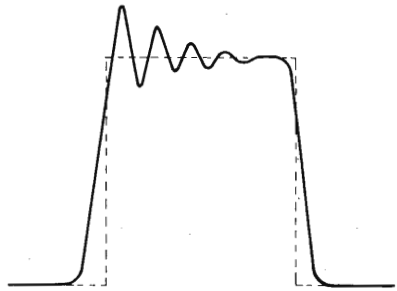


Fig. IX.17 - Esempio di risposta ad un'onda quadra di un amplificatore di potenza con carico capacitivo.

Delle sovraoscillazioni ciò che interessa è l'ampiezza del primo picco e la rapidità con cui queste si smorzano; più il picco è basso e più velocemente si smorza l'oscillazione, tanto migliore sarà la stabilità dell'amplificatore.

CAPITOLO DECIMO

IL SINTONIZZATORE

Il sintonizzatore è quell'elemento idoneo a ricevere le onde radio (onde elettromagnetiche) modulate in frequenza o in ampiezza. Analizzando brevemente la modulazione di frequenza e la modulazione d'ampiezza, si comprenderà come i due principi di modulazione sono utilizzati per la ricezione dei programmi musicali di elevata qualità.

X.1. La modulazione di frequenza e la modulazione d'ampiezza

Modulare un'onda elettromagnetica sinusoidale, detta portante, significa variare il valore di una o più delle sue grandezze fisiche (ampiezza, frequenza, fase) in funzione delle grandezze fisiche anch'esse variabili nel tempo, che costituiscono il segnale modulante.

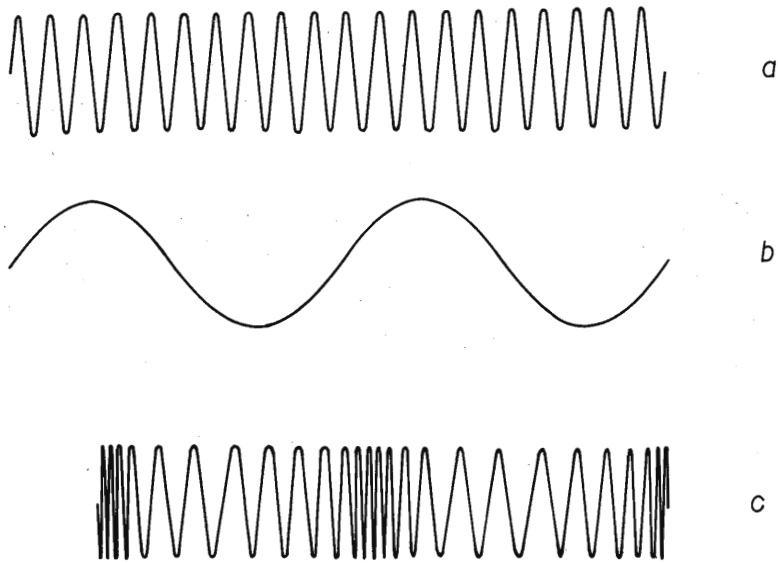


Fig. X.1 - La modulazione di frequenza: a) *onda portante;* b) *segnale modulante;* c) *onda modulata.*

Nel caso della modulazione di frequenza, la grandezza fisica che varia è solo la frequenza istantanea dell'onda portante sinusoidale; essa viene fatta variare in funzione dell'ampiezza e della frequenza dell'onda modulante (fig. X.1).

Nelle radiotrasmissioni a modulazione di frequenza (FM) si utilizzano diverse portanti i cui valori di frequenze sono compresi generalmente fra 88 e 108 MHz, mentre la banda di frequenza del segnale audio che viene trasmessa è di circa 15 kHz.

Per trasmettere l'ampiezza del segnale modulante, si fa variare proporzionalmente la frequenza dell'onda portante; più grande è la ampiezza del segnale trasmesso, maggiore è lo scarto di frequenza fra l'onda modulata e la portante (vedi fig. X.2 a, b).

Il tempo impiegato perché il segnale trasmesso passi dalla fre-

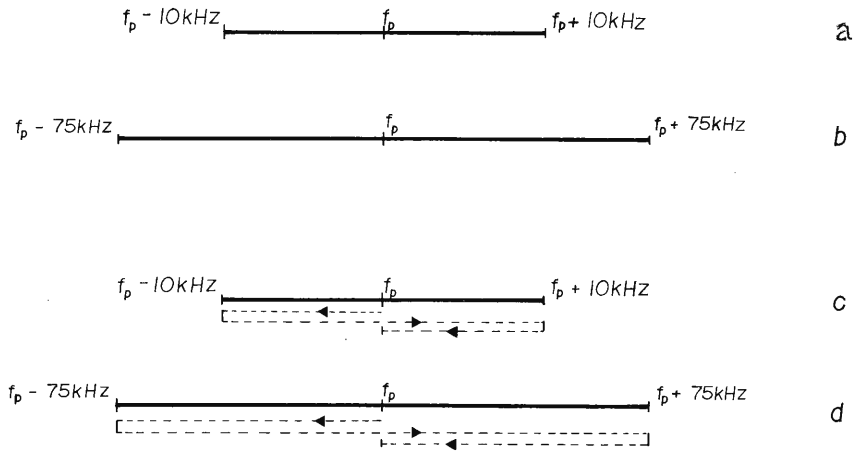


Fig. X.2 - La modulazione di frequenza.

a) *Il segnale modulante ha frequenza 1.000 Hz e ampiezza V_1: la frequenza dell'onda modulata varia ad esempio tra f_P, f_P — 10 kHz, f_P + 10 kHz, essendo f_P la frequenza portante.*

b) *Il segnale modulante ha frequenza 1.000 Hz, però ampiezza $V_2 > V_1$: si noti come lo scarto di frequenza (deviazione) sia maggiore. La deviazione di 75 kHz rappresentata in figura è la massima consentita e corrisponde alla massima ampiezza di segnale trasmissibile.*

c) *Il segnale modulante ha frequenza 1.000 Hz e ampiezza V_1: il tempo impiegato perché la frequenza del segnale trasmesso vari da f_P a f_P — 10 kHz, a f_P + + 10 kHz e infine ritorni a f_P è di 1 ms.*

d) *Il segnale modulante ha frequenza 1.000 Hz e ampiezza $V_2 > V_1$: il tempo impiegato perché la frequenza del segnale trasmesso vari da f_P a f_P — 75 kHz, a f_P + 75 kHz e ritorni a f_P, è ancora di 1 ms.*

quenza fondamentale f_p a quella più bassa, poi a quella più alta e ritorni infine alla frequenza fondamentale, come illustrato in figura X.2 c, d, corrisponde al periodo del segnale modulante.

Nel sistema di trasmissioni in FM le frequenze portanti si propagano come se fossero dei fasci di luce irradiati da un faro di automobile; purtroppo questo tipo di radiazione permette una portata ridotta e risente degli ostacoli che incontra nella sua traiettoria. La trasmissione in FM permette ricezioni con rumore di fondo molto ridotto. Infatti le trasmissioni sono realizzate con una certa accentuazione degli acuti del segnale modulante, per migliorarne il rapporto *S/N;* ciò avviene mediante un circuito detto di preenfasi. In fase di ricezione, le frequenze alte esaltate vengono attenuate mediante un circuito di deenfasi; con ciò si attenua della stessa entità anche il rumore, ottenendo il miglioramento del rapporto *S/N*.

I disturbi in FM sono dovuti agli impianti elettrici non schermati degli autoveicoli; questi vengono notevolmente attenuati purché si disponga in ricezione di un efficiente impianto d'antenna esterna.

Nella modulazione di ampiezza (AM) è solo l'ampiezza dell'onda portante sinusoidale che varia in funzione del segnale modulante, come illustrato in fig. X.3.

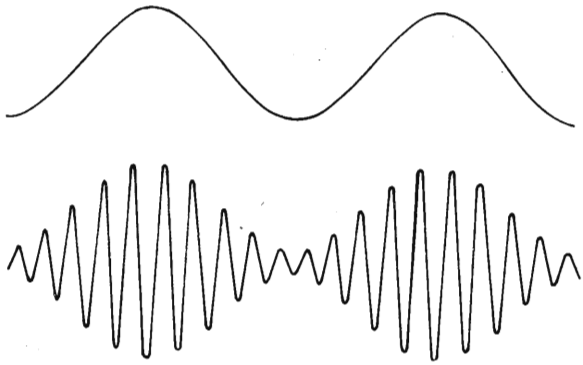


Fig. X.3 - La modulazione di ampiezza.

In AM, le frequenze delle portanti vengono suddivise in gamme i cui valori in generale sono:

Gamma onde lunghe OL: da 145 a 400 kHz.
Gamma onde medie OM: da 510 a 1.620 kHz.
Gamma onde corte OC: da 5,9 a 18 MHz.

In AM, dato il gran numero di trasmettitori che operano contemporaneamente, per evitare interferenze fra i segnali, si trasmettono segnali audio la cui banda è limitata a soli 4,5 kHz. Le trasmissioni AM sono particolarmente sensibili alle scariche elettriche di qualsiasi genere.

Se i segnali audio trasmessi nello spazio mediante modulazione di frequenza soddisfano le esigenze di un ascolto ad alta qualità, non altrettanto è per la modulazione d'ampiezza. La AM soddisfa le esigenze dell'alta fedeltà solo nel caso di trasmissioni per via cavo, trasmissioni per filodiffusione (FD).

X.2. Trasmissione e ricezione per filodiffusione

La trasmissione per filodiffusione richiede il collegamento del trasmettitore al ricevitore mediante cavo. In pratica, per ragioni economiche, viene utilizzata la rete telefonica. Sui fili del telefono la coesistenza dell'informazione dei normali collegamenti telefonici con i programmi trasmessi dalle stazioni radio non dà adito ad alcuna possibilità di interferenza, in quanto i segnali di filodiffusione sono in alta frequenza, nella gamma delle onde lunghe (178-343 kHz), mentre quelli telefonici sono in bassa frequenza. Per far ciò sono necessari opportuni filtri per miscelare in centrale i due segnali e separarli ai ricevitori. La scelta delle frequenze portanti nella gamma delle onde lunghe è stata determinata dalla necessità di ridurre le perdite sulle linee, che aumentano con il crescere della frequenza che viene trasmessa. In Italia si utilizzano sei canali suddivisi per frequenza nel seguente modo:

Canale 1: 178 kHz	Canale 2: 211 kHz	Canale 3: 244 kHz
Canale 4: 277 kHz	Canale 5: 310 kHz	Canale 6: 343 kHz

L'uniforme intervallo di 33 kHz tra le frequenze consente la trasmissione dei segnali la cui banda è di 15 kHz (30 Hz-15 kHz) e con valori di distorsione armonica e di intermodulazione in accordo con le esigenze dell'alta fedeltà.

Per riprodurre con elevata qualità le trasmissioni, è necessario un apparato ricevente realizzato con tecniche appropriate. Non è opportuno collegare la presa d'antenna dei radioricevitori comuni ad OL alla presa della filodiffusione, sebbene la ricezione sia possibile sintonizzando il radioricevitore sulla frequenza portante di uno dei canali FD. L'impiego di questi radioricevitori è sconsigliabile, sia per l'inadeguatezza della risposta in frequenza, che è di soli 4,5 kHz contro i 15 kHz trasmessi, sia per i disturbi causati dalla imperfetta sim-

metria del circuito d'entrata (vi sono però dei sintonizzatori Hi-Fi realizzati in modo da ricevere correttamente sia i programmi emessi per filodiffusione che per onde emesse nello spazio).

Gli unici disturbi che vengono recepiti dal sistema FD sono causati da: disco combinatore dell'apparecchio telefonico difettoso, apparati di commutazione difettosi, cavo con lunghi tratti esposti a campi elettromagnetici, dissimmetria del circuito d'entrata del ricevitore.

X.3. La ricezione FM

Il sintonizzatore ha il compito di isolare l'informazione sonora trasmessa mediante l'onda portante; questa operazione viene chiamata *demodulazione.* Perché il sintonizzatore possa esplicare correttamente le sue funzioni occorre che sia collegato ad una antenna.

Vi sono diversi tipi di antenne che possono essere collegate ad un medesimo sintonizzatore; la scelta dipende dalle differenti zone di ricezione. In generale, nelle zone urbane dove le potenze dei segnali sono elevate, e dove si hanno generalmente problemi di riflessione di segnali, si utilizzano antenne a basso guadagno, per evitare fenomeni di saturazione degli stadi d'ingresso del sintonizzatore, e alta direzionalità, per evitare la ricezione dei segnali riflessi.

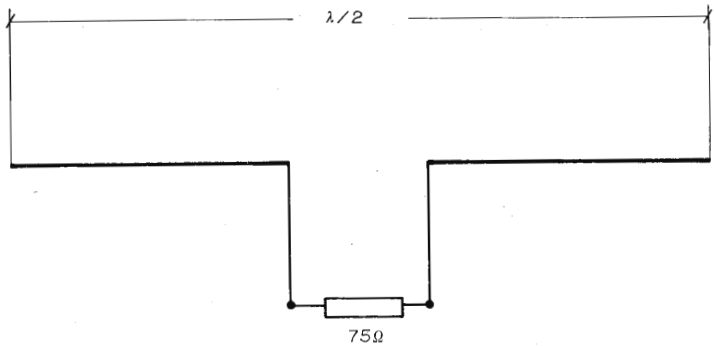


Fig. X.4 - Antenna dipolo a T.

Per guadagno di un'antenna si intende il rapporto fra la tensione misurata all'uscita dell'antenna in esame e la tensione misurata all'uscita di un'antenna a dipolo a T (fig. X.4), installate entrambe nel medesimo luogo e che ricevono lo stesso segnale.

La direzionalità, invece, si riferisce alle differenze di guadagno che si possono ottenere secondo le diverse orientazioni dell'antenna rispetto ad una stessa stazione trasmittente; in definitiva, la direzionalità definisce la capacità dell'antenna di captare le onde elettromagnetiche provenienti da una certa direzione.

Nelle zone dove i segnali sono deboli si utilizzano antenne ad alto guadagno.

Per una buona ricezione dei segnali FM è importante realizzare un buon adattamento dell'antenna al sintonizzatore; questa deve avere l'impedenza richiesta dal circuito d'entrata dell'apparecchio. I sintonizzatori che richiedono un'antenna da 300 Ω hanno la presa d'ingresso simmetrica e vengono collegati all'antenna mediante una piattina con 300 Ω d'impedenza; quelli che richiedono un'antenna da 75 Ω hanno la presa d'ingresso asimmetrica e vengono collegati alla antenna mediante un cavo coassiale di 75 Ω d'impedenza.

Il valore del minimo segnale applicato al sintonizzatore mediante l'antenna e rivelato in modo corretto costituisce la sensibilità dell'apparecchio; ma come negli amplificatori, per utilizzare in modo significativo questo valore, occorre considerare il rapporto segnale rumore. Secondo le norme DIN, un rapporto *S/N* di 26 dB è il minimo richiesto. Un sintonizzatore è tanto migliore di un altro quando, a parità di sensibilità, ha un rapporto *S/N* più alto. Infine, dato che spesso all'antenna sono presenti più segnali contemporaneamente, la selettività del sintonizzatore caratterizza la capacità dell'apparecchio di separare i segnali trasmessi da stazioni contigue.

X.4. Il sintonizzatore

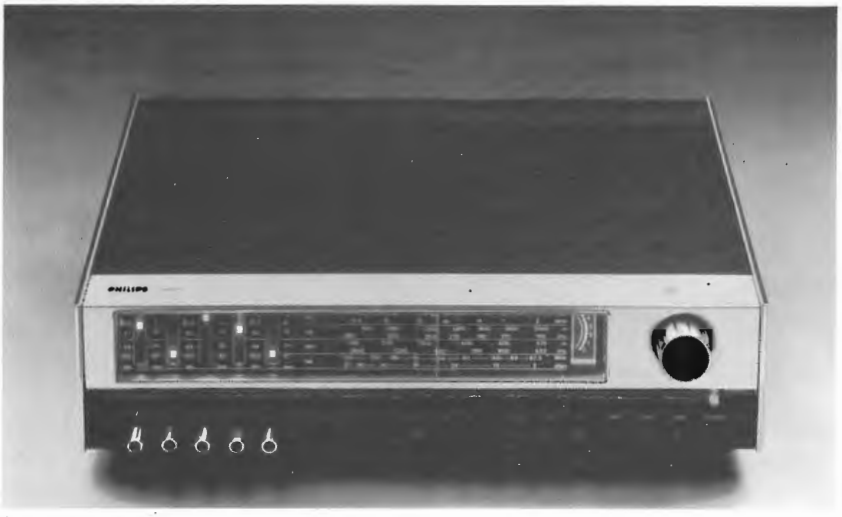
Un esempio di sintonizzatore è dato in figura X.5 a.

Le parti fondamentali che costituiscono un sintonizzatore sono: i circuiti ad alta frequenza 1 - 2 - 3, i circuiti a frequenza intermedia 4, il circuito di demodulazione FM 5, il circuito di deenfasi 7, e il preamplificatore di bassa frequenza 8, collegati come illustrato in fig. X.5 b.

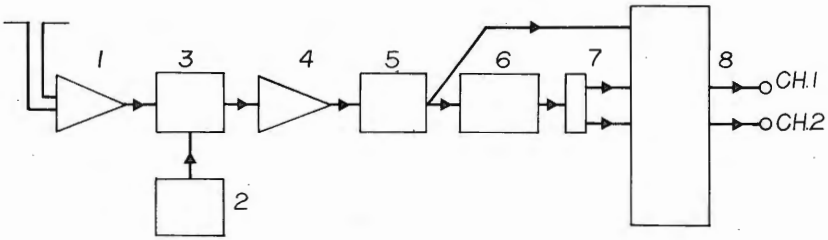
I circuiti ad alta frequenza comprendono: lo stadio d'ingresso 1, che ha il compito di amplificare il segnale proveniente dall'antenna; lo stadio riduttore di frequenza 3 con l'oscillatore 2, che trasformano il segnale ricevuto in uno avente le stesse caratteristiche di modulazione, ma con una frequenza portante di 10,7 MHz, detta frequenza intermedia; l'amplificatore a frequenza intermedia 4, che ha la funzione di elevare in tensione il segnale a 10,7 MHz; il demodulatore FM 5, che estrae dal segnale a 10,7 MHz modulato il segnale audio (se il sintonizzatore è stereofonico, vi è anche un decodificatore ste

reo 6 provvisto di due uscite, una per il canale sinistro ed una per il canale destro, di cui parleremo in seguito).

I circuiti a bassa frequenza comprendono: il circuito di deenfasi 7, di cui è stato detto al paragrafo X.1; il preamplificatore a bassa frequenza 8, che serve ad amplificare il segnale audio e ad adattare il sintonizzatore all'amplificatore di BF. Si fa presente che le caratteristiche dei circuiti di deenfasi dei sintonizzatori europei sono diverse da quelle dei sintonizzatori americani e giapponesi; conviene perciò assicurarsi della provenienza e della taratura dei sintonizzatori.



a



b

Fig. X.5 - a) Sintonizzatore stereo RM 651 (Philips); b) schema a blocchi di un sintonizzatore stereo.

Altri circuiti, non indicati in figura, sono:

a) Il circuito di controllo automatico di guadagno, che ha la funzione di ridurre il guadagno dei circuiti di amplificazione d'entrata del sintonizzatore per i segnali provenienti dall'antenna a livello troppo elevato, e di aumentare il guadagno se invece il segnale è debole; così facendo si evitano fenomeni di saturazione dei circuiti e quindi di distorsione.

b) Il circuito di controllo automatico di frequenza (AFC). Si tratta di un dispositivo che permette la sintonizzazione del ricevitore sulla frequenza di trasmissione quando tale operazione non sia stata correttamente eseguita manualmente e compensa eventuali slittamenti di frequenza da parte dell'oscillatore interno del sintonizzatore.

X.5. La decodifica dei segnali stereofonici

Il segnale stereofonico all'uscita del demodulatore è di tipo multiplex. Esso è costituito dai seguenti elementi:

1) Un segnale, formato dalla somma dei segnali stereofonici destro e sinistro S + D, che viene utilizzato per ascoltare con sintonizzatori monofonici programmi stereofonici, ma senza possibilità di effetto stereo.

2) Un segnale relativo alla differenza S — D dei segnali stereofonici; il segnale S — D in fase di trasmissione modula in ampiez-

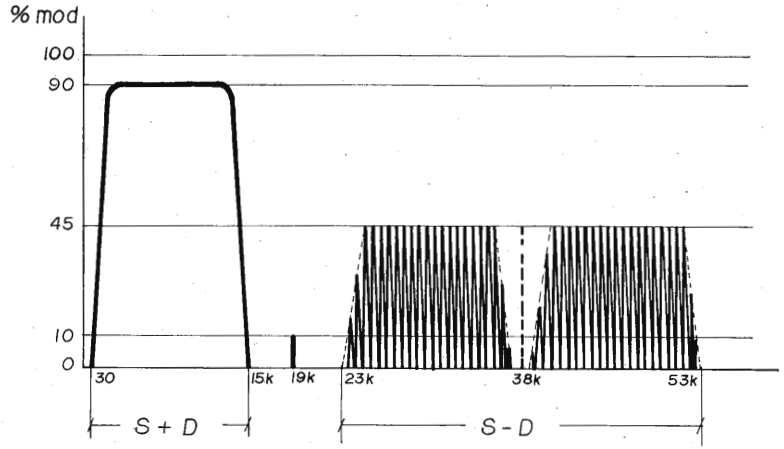


Fig. X.6 - Spettro del segnale multiplex che porta le informazioni relative a un programma stereo.

za un segnale ultrasonico a 38 kHz; tale frequenza però viene soppressa prima di irradiare il segnale complessivo dall'antenna trasmittente, vengono invece trasmesse le bande laterali ottenute dal processo di modulazione.

3) Un segnale alla frequenza di 19 kHz, destinato a ricreare, in fase di ricezione, il segnale ultrasonico soppresso in fase di trasmissione.

Tutti questi elementi fanno sì che la banda trasmessa abbia una larghezza da 30 Hz a 53.000 Hz; in fig. X.6 è illustrato lo spettro del segnale multiplex.

In fase di demodulazione occorre separare le componenti sinistra S e destra D da inviare alla sezione bassa frequenza. Per ottenere ciò, il demodulatore decodificatore presenta due sezioni a cui vengono convogliati separatamente i segnali S + D e S — D. In una sezione al segnale S + D viene sommato il segnale S — D, mentre nell'altra sezione al segnale S + D viene sottratto il segnale S — D, ottenendo nella sezione 1: (S+D) + (S—D) = 2S; nella sezione 2: (S+D) — (S—D) = 2D.

La fig. X.7 illustra il processo descritto.

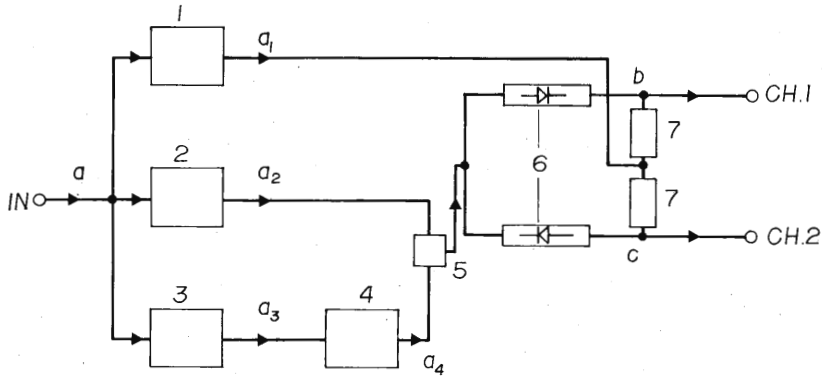


Fig. X.7 - Decodifica del segnale stereo.

1) *Filtro passa basso;* 2) *filtro passa banda;* 3) *filtro a 19 kHz;* 4) *duplicatore di frequenza per ottenere la frequenza di 38 kHz;* 5) *sommatore per permettere allo stadio 6 di separare S — D e — (S — D);* 6) *rivelatori e demodulatori;* 7) *circuiti sommatori;* a) *segnale multiplex con spettro illustrato in fig. X.6;* a_1) *segnale S + D (è in bassa frequenza: 30 Hz ÷ 15 kHz);* a_2) *bande laterali ottenute in trasmissione modulando la frequenza portante di 38 kHz col segnale S — D;* a_3) *segnale a frequenza 19 kHz;* a_4) *segnale a frequenza 38 kHz;* b) *segnale S — D, ottenuto dopo la rivelazione;* c) *segnale — (S — D), ottenuto dopo la rivelazione;* CH1) *uscita canale sinistro, ottenuta da (S+D) + (S—D) = = 2 S;* CH2) *uscita canale destro, ottenuta da (S + D) — (S — D) = 2 D.*

CAPITOLO UNDICESIMO

IL MICROFONO E IL REGISTRATORE

In questo capitolo si considerano la registrazione e riproduzione del suono nel caso che, come supporto dell'informazione, si usi il nastro magnetico anziché il disco. Si prendono in esame perciò i registratori magnetici e si analizzano le varie tecniche mediante le quali si sono rese possibili le attuali riproduzioni.

La registrazione può avvenire dal preamplificatore dei giradischi, dal sintonizzatore o dal vivo; in quest'ultimo caso è necessario l'uso del microfono. Per questo si premettono alcune considerazioni sui microfoni, sul loro funzionamento e le loro caratteristiche tecniche.

XI.1. Il microfono

Il microfono è un trasduttore meccanico-elettrico: le onde sonore fanno vibrare il trasduttore che ha la proprietà di trasformare le oscillazioni meccaniche in segnale elettrico. Si tratta del tipo di problemi già esaminati per gli altri trasduttori elettro-meccanici; le soluzioni, dal punto di vista del principio di funzionamento, sono perciò dello stesso tipo dei fonorivelatori e degli altoparlanti, adattate naturalmente al problema specifico che qui si deve risolvere: trasformare una oscillazione sonora in oscillazione elettrica.

I microfoni vengono qui trattati sotto tre aspetti: in primo luogo si considerano i vari tipi costruttivi e quindi le grandezze a cui sono sensibili; in secondo luogo si esaminano dal punto di vista oggettivo le caratteristiche elettro-acustiche; infine li si considera in rapporto alla sorgente del suono e in generale all'ambiente in cui avviene la registrazione.

1) *Tipi di microfoni.*

In relazione al principio di funzionamento, i microfoni possono essere classificati secondo i tipi che seguono.

a) Microfoni a carbone.

Una schematizzazione è rappresentata in figura XI.1. Sono microfoni a variazione di resistenza. La cavità compresa tra il diaframma *D*

e la struttura fissa *S* è riempita parzialmente di granuli di carbone, attraverso i quali si realizza il contatto elettrico tra diaframma ed elettrodo fisso. Se il diaframma vibra in conseguenza della presenza di un'onda sonora, i granuli risultano fra di loro più o meno compressi e quindi più o meno a contatto; varia di conseguenza la resistenza elettrica fra elettrodo fisso ed elettrodo mobile. Il generatore di forza elettromotrice *E* è in un circuito in cui la resistenza totale è

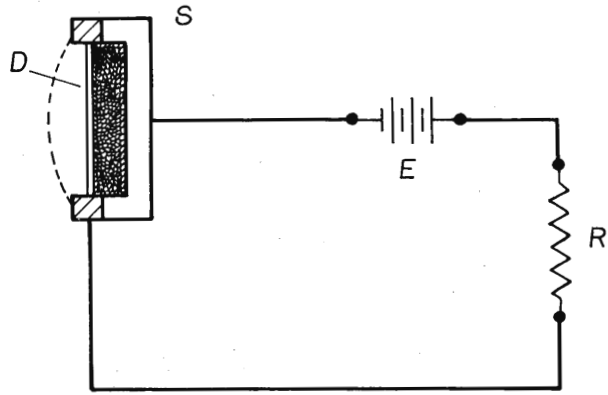


Fig. XI.1 - Microfono a carbone.

variabile e perciò varia la corrente attraverso la resistenza di carico *R*; la tensione ai capi della resistenza *R* è quindi proporzionale, in ultima analisi, all'ampiezza delle vibrazioni del diaframma.

Questo tipo di microfono non è usato in alta fedeltà, a causa dell'alta distorsione e del rumore.

b) Microfoni a ferro mobile o elettromagnetici.

Si veda la fig. XI.2 che rappresenta, in modo semplificato, uno dei microfoni del tipo elettromagnetico. Il magnete *M* determina un flusso nel circuito magnetico; il diaframma mobile in ferro *D*, al sopraggiungere dell'onda sonora, entra in vibrazione e perciò fa variare la lunghezza del traferro *T* e di conseguenza la riluttanza del circuito magnetico e il flusso. Ai capi della bobina fissa *B* si ha quindi una forza elettromotrice indotta che, in ultima analisi, è proporzionale alla velocità con cui oscilla il diaframma.

In questo tipo di microfono l'impedenza ha valori da pochi ohm ad alcune migliaia di ohm, a seconda del diametro del filo e delle

dimensioni della bobina; è da notare che, trattandosi di una bobina, l'impedenza è praticamente una reattanza induttiva, il cui valore è proporzionale alla frequenza.

c) Microfoni elettrostatici (a condensatore).

Si veda la fig. XI.3. Il diaframma *D* e la piastra *A* costituiscono le armature di un condensatore; le vibrazioni del diaframma, al sopraggiungere dell'onda sonora, fanno sì che vari la distanza fra le armature e perciò la capacità del condensatore. Se si applica una tensione di polarizzazione fissa, di solito dell'ordine di 200 V, al variare della

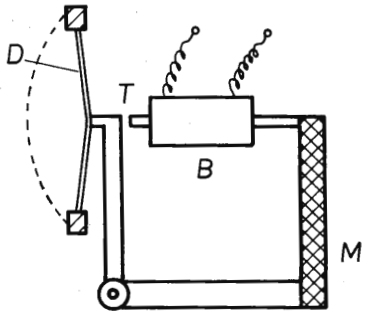


Fig. XI.2 - Microfono elettromagnetico.

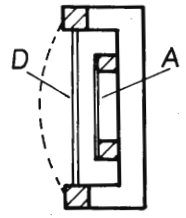


Fig. XI.3 - Microfono elettrostatico.

capacità fra *D* e *A*, si ha nel circuito una corrente variabile, che dipende dallo spostamento del diaframma; infatti se ad esempio la capacità aumenta, il condensatore tende a caricarsi maggiormente, in quanto la carica è proporzionale alla capacità, a parità di tensione applicata.

La capacità fra le armature dipende dalla distanza e dalle dimensioni delle stesse ed è di solito compresa fra alcuni pF ed alcune decine di pF. Si ha $C = \varepsilon \cdot S/d$, dove ε è la costante dielettrica dell'aria, S è la superficie delle armature affacciate e d la loro distanza. La superficie non può essere molto grande, diversamente aumentano le dimensioni di ingombro; la distanza tra le armature non può scendere al disotto di certi limiti, in quanto si deve consentire che il diaframma vibri anche per ampi segnali acustici, senza venire in contatto con l'armatura fissa.

L'impedenza è di tipo capacitivo e quindi, dato che $X_c = \frac{1}{\omega C}$,

è elevata alle basse frequenze e diminuisce al crescere della frequenza.

Questo tipo di microfono ha l'inconveniente di richiedere una tensione di polarizzazione; tale svantaggio viene superato nei microfoni ad elettreti, che hanno la proprietà di mantenere una polarizzazione, senza quindi che si debba applicare un generatore esterno.

Altri inconvenienti che presenta il microfono a condensatore sono la delicatezza e l'alta impedenza, data la bassa capacità.

Ha il vantaggio di avere piccole dimensioni e una sensibilità indipendente dalla frequenza. È un microfono di altissima fedeltà, usato nelle misure di laboratorio e quando occorrono prestazioni di qualità superiore.

d) Microfoni piezoelettrici.

Si basano sul fenomeno della piezoelettricità, già visto considerando i fonorivelatori piezoelettrici. La struttura è quella di fig. XI.4 a.

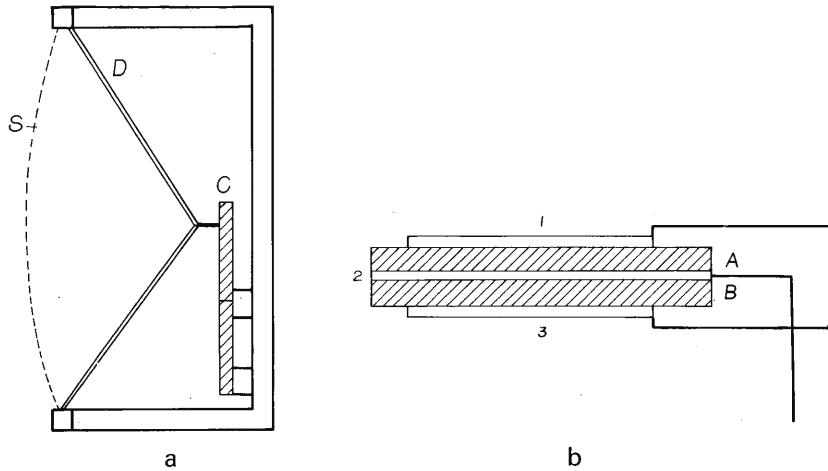


Fig. XI.4 - a) *Microfono piezoelettrico;* b) *microfono elettrostrittivo: tipo a due piastrine.*

La piastrina di cristallo piezoelettrico *C* vibra, in seguito alle oscillazioni del diaframma *D*; questo talvolta può mancare e la sbarretta fungere essa stessa da diaframma. Tra le due facce opposte del cristallo si genera una differenza di potenziale che dipende dall'inten-

sità delle vibrazioni e perciò dal segnale acustico incidente. Si noti la presenza dello schermo protettivo *S*.

Il cristallo usato è sale di Rochelle o fosfato monoammonico; data l'influenza di fattori climatici sul loro comportamento, sono stati superati dai microfoni con elementi ceramici.

L'impedenza dei microfoni piezoelettrici è capacitiva e perciò elevata alle basse frequenze; la capacità è dell'ordine delle migliaia di pF.

e) Microfoni elettrostrittivi (ceramici).

La loro struttura è analoga ai precedenti piezoelettrici. Il trasduttore è una piastrina di materiale ceramico oppure è costituito da due piastrine come in figura XI.4 b; le due piastrine *A* e *B* sono comprese fra gli elettrodi 1 - 2 - 3. A seguito delle vibrazioni dell'elemento ceramico, si genera fra le due facce opposte una differenza di potenziale che è tanto maggiore quanto maggiore è l'ampiezza del segnale.

Il materiale ceramico usato è il titanato di bario.

f) Microfoni dinamici (a nastro o a bobina mobile).

Si basano sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica: se un conduttore si muove in un campo magnetico, tagliando le linee di flusso, nasce ai suoi capi una forza elettromotrice. Nel nostro caso

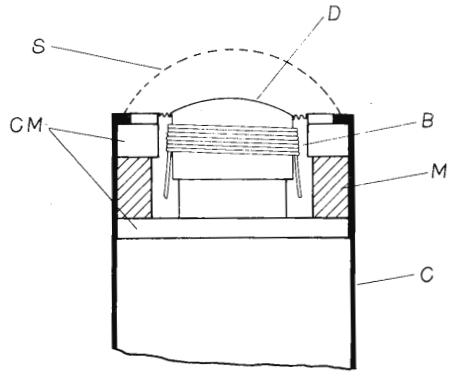


Fig. XI.5 - Microfono a bobina mobile.

il conduttore può essere un filo, un nastro o una bobina. Un esempio di schema di microfono dinamico è in fig. XI.5. Il magnete permanente *M* crea un flusso che interessa il circuito magnetico *CM*. Pro-

tetto dallo schermo *S* e dalla custodia *C*, il diaframma *D* vibra a seguito della presenza di un'onda sonora, e trasmette le sue oscillazioni alla bobina *B;* le spire di questa tagliano le linee del campo e perciò ai capi della bobina si ha una forza elettromotrice proporzionale alla velocità di oscillazione.

L'impedenza di questo tipo di microfono è bassa, in quanto la bobina deve essere di piccole dimensioni; il suo valore può essere dai decimi di ohm alle decine di ohm. Trattandosi di un avvolgimento di non molte spire, l'impedenza si può ritenere puramente resistiva e perciò praticamente indipendente dalla frequenza. Di solito è presente un trasformatore elevatore, compreso nello stesso microfono, per adattare la bassa impedenza del microfono alla impedenza della linea di collegamento all'amplificatore.

Questo tipo di microfono è molto usato in alta fedeltà.

2) *Caratteristiche elettro-acustiche dei microfoni.*

Si considerano le caratteristiche elettriche ed acustiche dei microfoni, misurabili e perciò oggettive; esse ci danno indicazioni sul comportamento dei microfoni e ci permettono un confronto tra i vari tipi in commercio.

a) Sensibilità e curva di risposta.

Si intende per sensibilità di un microfono, ad una data frequenza, il rapporto tra la tensione ottenuta ai suoi capi e la pressione acustica a cui è soggetto in conseguenza del segnale acustico incidente. La misura della tensione viene fatta a circuito aperto: si considera cioè la forza elettromotrice generata. Occorre tenere presente che a carico, cioè nelle condizioni effettive di impiego, la tensione ai morsetti è inferiore, data la caduta di tensione sull'impedenza interna del microfono. Per quanto riguarda la pressione acustica, la si determina nella camera anecoica, nello stesso punto in cui verrà inserito il microfono; in questo modo i risultati sono indipendenti dalla perturbazione prodotta nell'ambiente dall'introduzione del microfono.

La sensibilità dipende dalla frequenza delle onde sonore e dalla direzione secondo cui esse incidono sul microfono, come sarà spiegato più avanti.

Per quanto riguarda il comportamento del microfono alle varie frequenze, si può determinare la curva di risposta, come si è fatto per gli altoparlanti. Essa si ottiene variando la frequenza del segnale sonoro e determinando la sensibilità alle varie frequenze; un buon microfono ha una curva di risposta il più possibile orizzontale. Un esempio è dato in fig. XI.6.

b) Direzionalità.

La direzionalità indica la caratteristica dei microfoni di presentare all'uscita una tensione diversa, a seconda della direzione di provenienza delle onde sonore. Le prove si effettuano facendo ruotare il microfono in una camera anecoica, tenendo fissi: intensità dell'onda sonora della sorgente, posizione della sorgente, punto in cui è posto

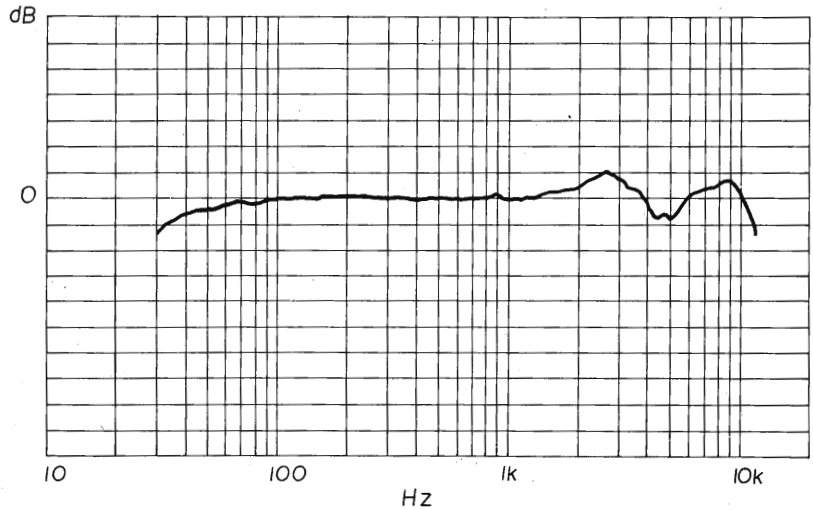


Fig. XI.6 - Curva di risposta di un microfono.

il microfono e frequenza del segnale sonoro. I risultati possono essere rappresentati, per ogni frequenza, mediante diagrammi direzionali o polari; in essi si porta, a partire dall'origine *O*, su ogni raggio individuato da un angolo α, un segmento *OP* proporzionale alla sensibilità del microfono in quella direzione. Un esempio è dato in figura XI.7 (cardioide).

In effetti si dovrebbe costruire un solido direzionale, che rappresenti le proprietà del microfono in tutte le direzioni dello spazio; molto spesso però i diagrammi direzionali in un piano orizzontale e in un piano verticale consentono di caratterizzare sufficientemente le proprietà di un microfono.

Per sintetizzare le caratteristiche di direzionalità di un microfono con un numero, si è introdotto il fattore di direzionalità. Si pone il microfono in prova in un ambiente riverberante e si determina, in presenza di un campo sonoro, la tensione V_1 ai capi del microfono

stesso. Successivamente, nello stesso punto dell'ambiente e mantenendo lo stesso campo, si pone un microfono detto panoramico, un microfono cioè la cui sensibilità non dipende dalla direzione (in fi-

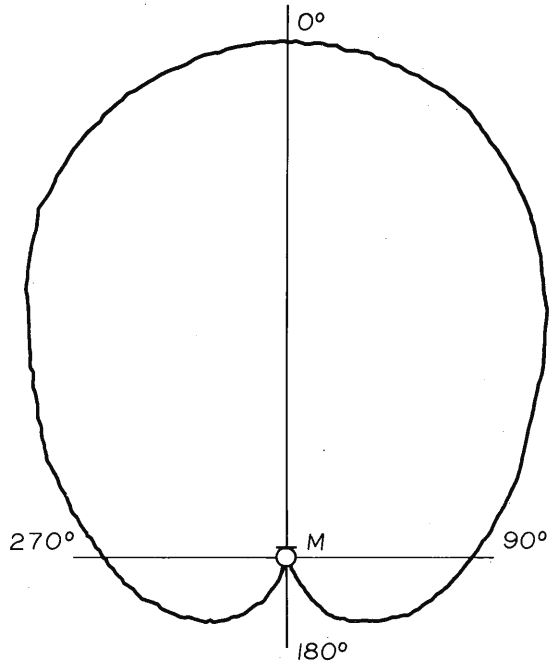


Fig. XI.7 - Esempio di diagramma direzionale (cardioide).

gura XI.8 si vede il suo diagramma direzionale); si sceglie un microfono panoramico la cui sensibilità sia uguale alla sensibilità massima del microfono in prova. Sia V_2 la tensione ai suoi capi. Si definisce come fattore di direzionalità $(V_2/V_1)^2$, rapporto che può essere espresso in dB.

Indubbiamente le caratteristiche dei microfoni sono meglio rappresentate dai diagrammi direzionali; il fattore di direzionalità ci permette comunque di avere un'idea del comportamento del microfono. Un valore prossimo all'unità indica un microfono di caratteristiche simili al microfono panoramico; esso è in grado di rivelare con la stessa intensità onde sonore provenienti da diverse direzioni; in alcuni casi ciò può essere necessario, in altri può costituire uno svantaggio, in quanto il rumore di fondo dell'ambiente influenza notevol-

mente la risposta del microfono. Un valore elevato del fattore di direzionalità indica, all'opposto, che il microfono è poco influenzato dall'ambiente ed è sensibile soprattutto alle onde sonore che provengono da determinate direzioni.

c) Rumore di fondo.

Si indica con rumore di fondo la tensione che si rileva ai capi del microfono a circuito aperto e in assenza di onda sonora incidente. La sua valutazione è importante, in quanto un'onda sonora, per essere rilevabile, deve dare una tensione superiore alla tensione di rumore. La tensione di rumore si misura in dB, riferiti ad un valore di riferimento, che può essere 1 mV oppure 1 V; oppure ci si riferisce alla pressione acustica equivalente alla tensione di rumore.

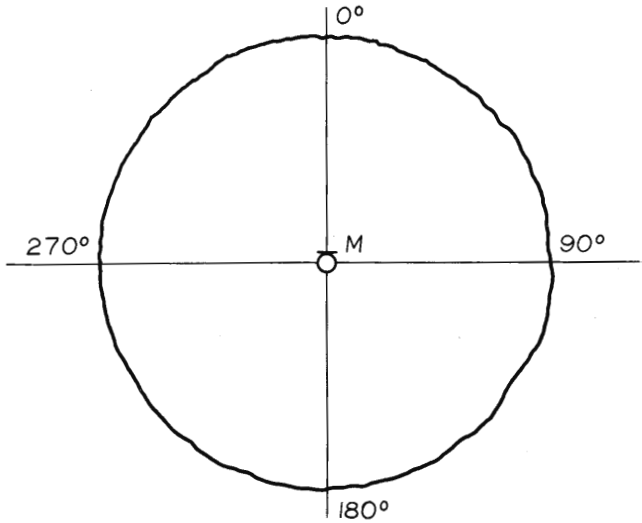


Fig. XI.8 - Diagramma direzionale di un microfono panoramico.

Si tenga presente che la tensione di rumore varia con la frequenza; inoltre, ad una determinata frequenza, varia con l'ampiezza della banda considerata: infatti più ampia è la banda, maggiore è il numero di componenti che contribuiscono al rumore. L'indicazione del rumore di fondo deve essere perciò completata con l'indicazione della frequenza e della banda relativa alla misura.

d) Distorsione.

I) *Distorsione di non linearità.* Si dice che un microfono ha distorsione di non linearità quando il segnale elettrico di uscita non è proporzionale al segnale acustico incidente. Se, ad esempio, il segnale acustico è un'onda sinusoidale di frequenza f, il segnale elettrico può contenere, se il microfono non è lineare, oltre alla componente fondamentale di frequenza f, altre componenti di frequenza $2f$, $3f$, ecc., dette armoniche. Se poi l'onda sonora è più complessa, essa, se periodica, può essere pensata come somma di più onde sinusoidali; se il microfono non è lineare, il segnale elettrico può contenere, oltre a tali componenti desiderate, le loro armoniche e i prodotti di intermodulazione (il problema è analogo a quello già esaminato trattando gli altri trasduttori).

II) *Distorsione ai transitori.* Essa indica l'incapacità del microfono di manifestare una tensione elettrica che corrisponde al segnale acustico, quando questo varia molto rapidamente; ogni sistema elettromeccanico ha infatti una sua inerzia.

e) Impedenza elettrica.

Si definisce come impedenza elettrica di un microfono il rapporto fra la tensione applicata e la corrente assorbita. La procedura di misura è dello stesso tipo di quella usata per gli altoparlanti. L'impedenza elettrica è funzione della frequenza e perciò occorre specificare la frequenza a cui è fatta la misura o determinare il diagramma di come l'impedenza varia in funzione della frequenza. L'importanza di tale impedenza consiste nel fatto che, al variare del carico del microfono, la tensione sul carico varia, a parità di segnale acustico incidente. Il microfono può essere infatti rappresentato col circuito equivalente di figura XI.9 e, come si è già visto parlando dei fonorivelatori, la natura e il valore di Z_e e Z determinano la tensione V sul carico, a parità di E.

3) *I microfoni e la sorgente sonora.*

La scelta del tipo di microfono dipende dall'ambiente in cui si effettua la registrazione e in particolare dalla posizione del microfono in relazione alle sorgenti di onde sonore che si vogliono registrare. I casi più comuni sono i seguenti.

a) L'onda sonora proviene da una sorgente determinata e si vuole che tale segnale prevalga su quello riverberato dall'ambiente, per approssimare la sensazione che si ha nell'ascolto diretto; un

caso particolare è quello in cui sono presenti rumori provenienti da direzioni diverse da quella desiderata, rumori che si vogliono attenuare. In queste situazioni si impiegano i microfoni direzionali, le cui caratteristiche dipendono dalla direzione di provenienza dell'onda sonora.

Si hanno i microfoni bidirezionali, i quali hanno un diagramma del tipo di fig. XI.10: essi previlegiano perciò le onde sonore che provengono in direzione assiale. Hanno questa caratteristica i microfoni a gradiente di pressione. Si tratta di microfoni a nastro o a bobina mobile in cui si permette all'onda sonora di giungere anche alla faccia posteriore del diaframma. In sostanza il diaframma è soggetto a due onde di pressione, che compiono cammini di lunghezza diversa per raggiungere le due facce del diaframma, arrivando quindi sfasate;

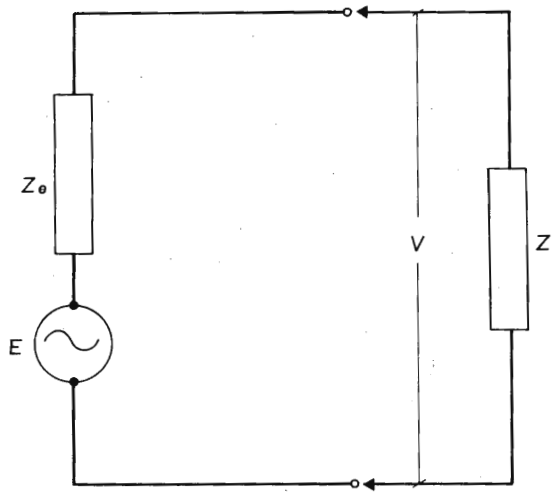


Fig. XI.9 - Circuito equivalente di un microfono.

le pressioni sulle due facce sono perciò differenti ed è la differenza (gradiente) di pressione che determina la vibrazione del trasduttore. A seconda della direzione di provenienza delle onde rispetto all'asse del microfono, varia la differenza di cammino e perciò la differenza di pressione e in conclusione la sensibilità del microfono.

I microfoni unidirezionali sono invece caratterizzati dal fatto di essere sensibili praticamente solo alle onde sonore provenienti dal

semispazio anteriore; un esempio è in fig. XI.7 (microfono a cardioide). Caratteristiche direzionali ancora più accentuate si possono ottenere con microfoni speciali, come i microfoni a riflettore, in cui una superficie parabolica riflette le onde sonore nel fuoco, dove si trova il trasduttore; la direzione di massima sensibilità è quella dell'asse della superficie.

b) L'onda sonora può provenire da qualsiasi direzione dello spazio. In questa situazione si adoperano i microfoni panoramici che, come si è visto, hanno una sensibilità indipendente dalla direzione.

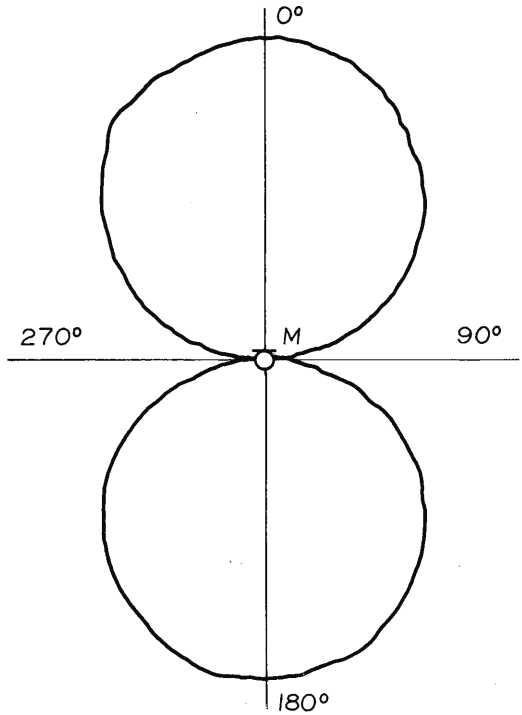


Fig. XI.10 - Diagramma direzionale di microfono bidirezionale.

Il diagramma direzionale è rappresentato in fig. XI.8; questo comportamento si ottiene facendo incidere l'onda sonora solo su una faccia del diaframma, mentre l'altra faccia si trova alla pressione atmosferica. Le dimensioni del microfono devono essere piccole in rapporto

alla lunghezza d'onda; diversamente si verificano fenomeni di diffrazione, che danno al microfono caratteristiche direttive. I tipi più usati sono a condensatore ed a bobina mobile.

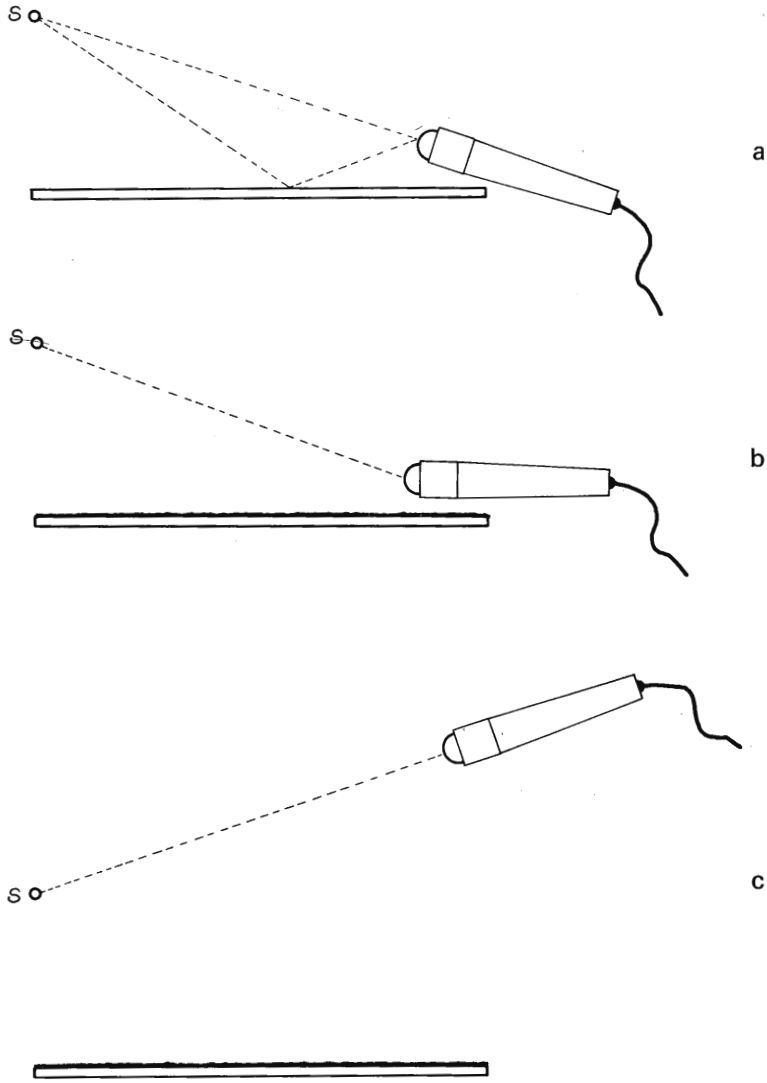


Fig. XI.11 - La registrazione della voce di una persona seduta a un tavolo.

4) *Disposizione del microfono nella registrazione: alcune esemplificazioni.*

a) Registrazione di un'intervista.

Il microfono è disposto di solito vicino a chi parla; con ciò si riducono gli effetti sia dei rumori ambientali che della riverberazione.

b) Registrazione della voce di una persona seduta a un tavolo (fig. XI.11).

Come si vede nella figura XI.11 a, al microfono giungono sia l'onda diretta sia l'onda riflessa dalla superficie del tavolo; si possono perciò avere fenomeni di interferenza, con conseguente diminuzione della tensione di uscita ad alcune frequenze. Per evitare questo inconveniente, si può adottare la disposizione di fig. XI.11 b, coprendo il tavolo con un panno assorbente. Un'altra soluzione raccomandata è quella di fig. XI.11 c: lo speaker è a circa 50 cm dal microfono; il tavolo è basso, perforato o ricoperto di panno assorbente; il registratore è possibilmente distante.

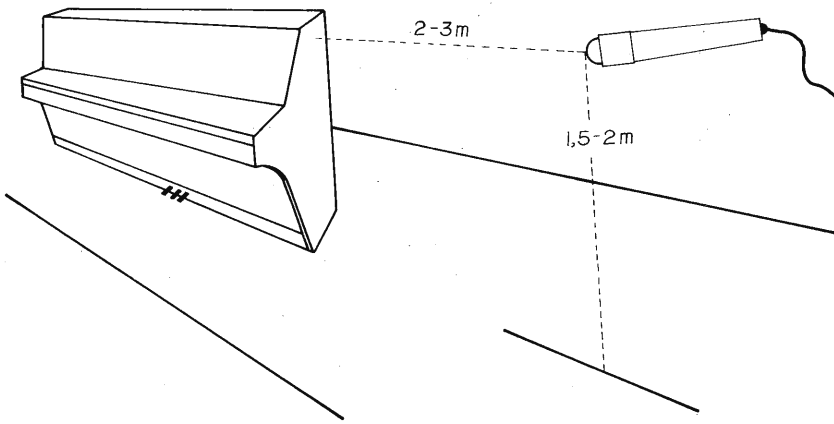


Fig. XI.12 - Registrazione del suono di un pianoforte.

c) Registrazione del suono di un pianoforte (fig. XI.12).

La disposizione ideale sarebbe di collocare il microfono ad una altezza di circa due metri in posizione intermedia tra parete e parte posteriore del piano. Non essendo spesso possibile questa soluzione, si ricorre alla disposizione di fig. XI.12. Da notare che il microfono si trova sul lato destro e non sul sinistro, dato che alle note alte

(tasti di destra) si ha una potenza acustica più bassa; inoltre il microfono deve essere sufficientemente distante dal piano, in modo da non raccogliere i rumori del pedale.

d) Registrazione del suono di un violino (fig. XI.13).

In figura si vede come il suono emesso dal violino sia direttivo alle frequenze più alte; alle frequenze basse invece l'energia sonora è distribuita più uniformemente. Il microfono deve essere perciò posto tenendo conto di questi limiti, ad una distanza di circa un metro dallo strumento.

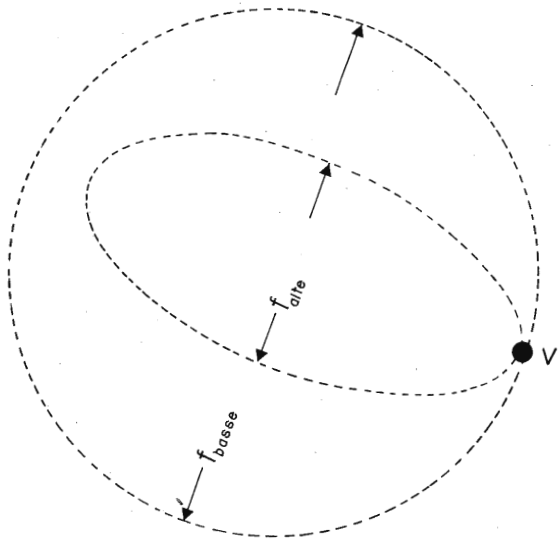


Fig. XI.13 - Distribuzione nello spazio dei suoni prodotti da un violino.

e) Registrazione del suono di trombe e altri strumenti a fiato.

Il microfono deve essere posto in direzione dei punti di emissione del suono; in particolare per la tromba deve essere sull'asse di questa. La distanza è di circa un metro e mezzo e deve essere aumentata nel caso in cui la pressione sia eccessiva.

f) Registrazione del suono di tamburi, piatti ed altri strumenti a percussione.

Il problema è complesso per il fatto che questi strumenti sono in genere raggruppati ed hanno caratteristiche di frequenza, di diret-

tività e di pressione dell'onda sonora molto diverse. È indispensabile perciò l'uso di più microfoni, cercando di individuare sperimentalmente la posizione migliore.

g) Uso di più microfoni.

L'uso di due o più microfoni consente di avvicinare maggiormente i microfoni stessi alle diverse sorgenti di onde sonore, nel caso di gruppi musicali composti di più strumenti. Vi è però il rischio di avere interferenze. Infatti il suono emesso da uno strumento è raccolto da più microfoni a distanze diverse dalla sorgente; essi generano quindi tensioni sfasate tra di loro e può accadere che, a certe frequenze, si abbiano affievolimenti. Per limitare questo inconveniente,

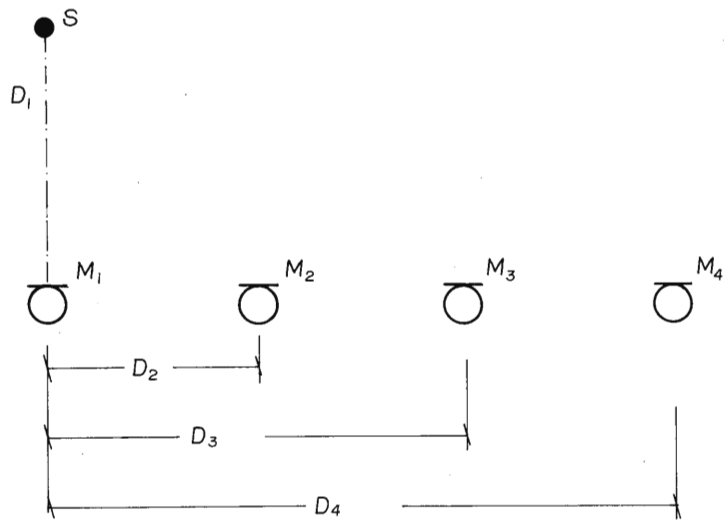


Fig. XI.14 - Uso di più microfoni.

occorre che i microfoni siano sufficientemente distanti. Si può ricorrere a disposizioni simili a quella di fig. XI.14: se $D_2 \geqslant 3\,D_1$, l'interferenza è trascurabile, poiché il segnale che giunge al microfono M_2 è molto minore di quello raccolto da M_1, data la maggiore distanza. Lo stesso vale per gli altri microfoni. L'uso di microfoni direttivi opportunamente orientati consente di ridurre ancora di più il rischio di interferenze.

h) Registrazione stereo (fig. XI.15).

La soluzione ideale consiste nell'usare più microfoni, ognuno in corrispondenza di uno strumento, registrare i vari segnali sonori e poi miscelarli opportunamente, in modo da ottenere due soli canali che diano l'effetto voluto: sono gli stessi criteri che si sono visti per la registrazione su disco, criteri che richiedono una attrezzatura quale solo una casa discografica può avere.

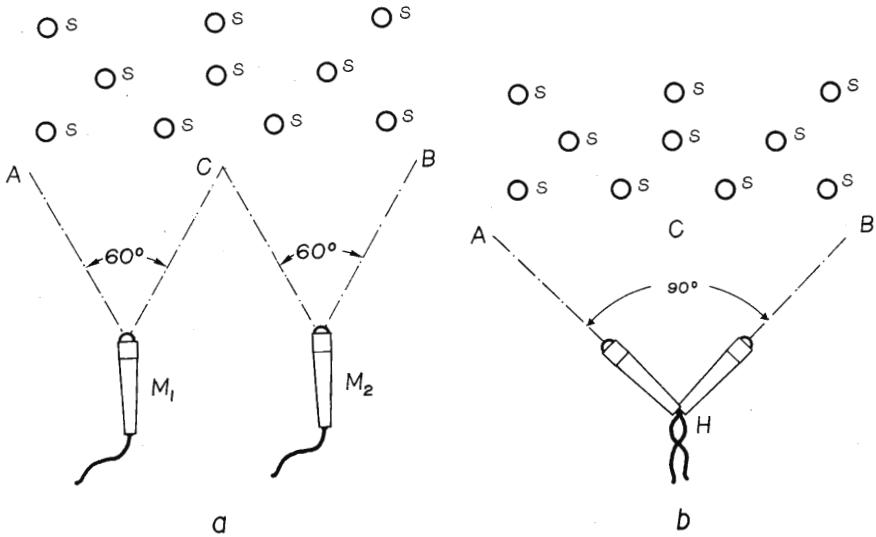


Fig. XI.15 - Registrazione stereo: a) *microfoni paralleli;* b) *microfoni perpendicolari.*

Più semplicemente si può adottare la soluzione schematizzata in fig. XI.15 a; i due microfoni M_1 e M_2, disposti parallelamente, devono vedere le due metà del gruppo musicale secondo un angolo di 60°, cioè i triangoli $A M_1 C$ e $C M_2 B$ devono essere equilateri. L'inconveniente di questa soluzione sta nel fatto che, nella fase di ascolto, si ha la sensazione di un "buco nel mezzo", cioè che non provengano suoni dalla zona centrale compresa fra i due altoparlanti riproduttori. Si è cercato di eliminare l'inconveniente usando un terzo microfono, posto in posizione centrale, che alimenta entrambi i canali.

La soluzione più soddisfacente è però quella rappresentata in fig. XI.15 b: due microfoni direzionali, del tipo a cardioide, sono disposti nel punto *H* e ad angolo retto. È molto importante che abbiano

le stesse caratteristiche; molto spesso si hanno due capsule, tra loro perpendicolari, già predisposte all'interno di un microfono.

XI.2. Il registratore: le caratteristiche meccaniche

Per l'esame del registratore, consideriamo in via preliminare i problemi relativi al sistema meccanico. Il meccanismo di trascinamento deve garantire lo scorrimento del nastro magnetico a velocità costante; i problemi che si incontrano sono analoghi a quelli già visti per i piatti dei giradischi. In particolare il nastro deve muoversi con velocità uguale ad una delle velocità normalizzate (4,75; 9,5; 19; 38 cm/s), con una tolleranza massima dello 0,5 %; inoltre tale velocità non deve subire fluttuazioni, in quanto ciò sarebbe causa di variazioni della frequenza dei suoni: avremmo cioè gli stessi fenomeni di wow e flutter che si sono visti per i giradischi; le fluttuazioni devono essere inferiori allo 0,1 %. Nei registratori il problema della regolarità della velocità ha importanza ancora maggiore, in quanto le

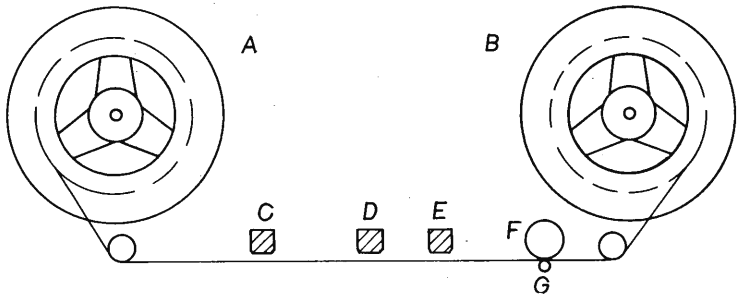


Fig. XI.16 - Il meccanismo di trascinamento del nastro.

fluttuazioni possono avvenire sia nella fase di registrazione sia nella fase di lettura, quindi l'errore è moltiplicato per due, è come se l'irregolarità fosse doppia. Un'altra difficoltà consiste nel fatto che non è possibile trasmettere il movimento rotatorio dal motore semplicemente alla bobina raccoglitrice; infatti questa, man mano che su di essa si raccoglie il nastro, aumenta di diametro e quindi, a parità di velocità di rotazione, la velocità del nastro non rimane costante ma aumenta. È stato perciò necessario ricorrere a un meccanismo di trascinamento di struttura diversa, mediante il capstan. Una schematizzazione è data in fig. XI.16. *A* e *B* sono le bobine erogatrice e raccoglitrice; *C, D, E* sono tre testine; *G* è il capstan, *F* un disco di

gomma che, quando il registratore è in funzione, preme con forza il nastro contro il capstan. Il capstan è il responsabile del trascinamento del nastro; è un cilindro verticale, sottile, rettificato, solidale ad un volano, posto in rotazione dal motore; ruotando, trascina il nastro che, come si è detto, è stretto tra capstan e un rullo di gomma. Una coppia motrice fa ruotare la bobina raccoglitrice *B*, mentre una leggera coppia frenante è applicata alla bobina erogatrice *A*; in questo modo si garantisce una sufficiente tensione del nastro.

La trasmissione del movimento dal motore al capstan può essere indiretta o diretta.

1) *Trasmissione indiretta.*

Il movimento di rotazione del motore è trasmesso, mediante un sistema di demoltiplica, ad un volano solidale al capstan. Il sistema di demoltiplica è necessario in primo luogo per permettere le diverse velocità di trascinamento normalizzate del nastro; in secondo luogo, data la velocità dei motori comuni, sarebbe necessario un capstan di diametro piccolo e quindi molto fragile.

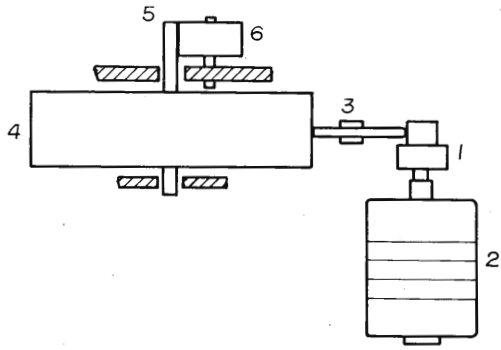


Fig. XI.17 - La trasmissione del movimento al volano mediante puleggia.

Le realizzazioni pratiche sono analoghe a quelle viste per i giradischi. Si può avere, come in fig. XI.17, il trascinamento mediante puleggia a più piani 1 solidale col motore 2 e puleggia intermedia 3 tra questa e il volano 4. Si notino il capstan 5 e il rullo di pressione 6.

Un'altra soluzione è il trascinamento mediante cinghia tra motore e volano (fig. XI.18); il cambio di velocità è ottenuto meccanicamente, calettando più pulegge sull'asse del motore, oppure elettricamente, mediante commutazione del numero dei poli del motore.

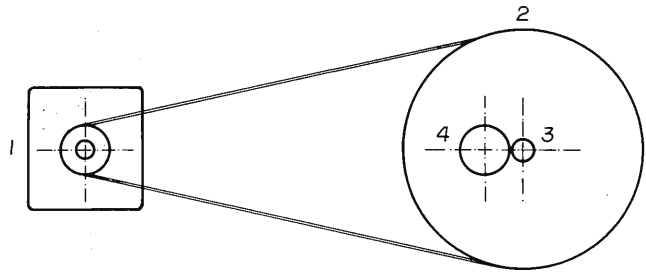


Fig. XI.18 - La trasmissione del movimento al volano mediante cinghia. Si notino il motore 1, il volano 2, il capstan 3 e il rullo a pressione 4.

2) *Trasmissione diretta.*

In questo caso il capstan è solidale con il motore. Si può utilizzare:

a) un motore sincrono alimentato da un generatore a frequenza variabile, in modo da poter ottenere le velocità desiderate;

b) un motore a corrente continua a effetto Hall; il controllo di velocità è ottenuto variando la tensione di alimentazione;

c) un motore asincrono la cui velocità è controllata elettronicamente.

Si è così visto il modo con cui si trasmette il movimento al capstan; rimane da considerare la rotazione delle bobine. Si hanno registratori a un solo motore e a tre motori.

1) *Registratori a un solo motore.*

Si è visto come si ottiene la rotazione del capstan; dal motore stesso, mediante cinghie e pulegge, il movimento è trasmesso agli assi delle bobine. Le due bobine non sono però solidali con gli assi cui è trasmessa la coppia dal motore, ma sono collegate ad essi mediante dispositivi a frizione, che consentono uno slittamento reciproco. Un esempio è in fig. XI.19. Alla bobina raccoglitrice deve essere applicata una coppia motrice, nel senso del moto, in modo che il nastro possa avvolgersi e rimanere teso. Dato però che il diametro della bobina aumenta man mano che il nastro si avvolge, la sua velocità di rotazione deve diminuire, in modo da consentire una velocità costante del nastro; siccome, d'altra parte, la velocità del nastro è determinata dal capstan, la bobina raccoglitrice deve poter slittare

rispetto al proprio asse che, comandato dal motore, ruota a velocità costante: si ottiene ciò mediante un dispositivo a frizione. Per quanto riguarda invece la bobina erogatrice, essa ruota nello stesso senso del capstan e dell'altra bobina, però ad essa è applicata una coppia frenante, in modo da garantire la tensione del nastro; evidentemente è indispensabile un dispositivo a frizione, dato che coppia e movimento sono di verso opposto.

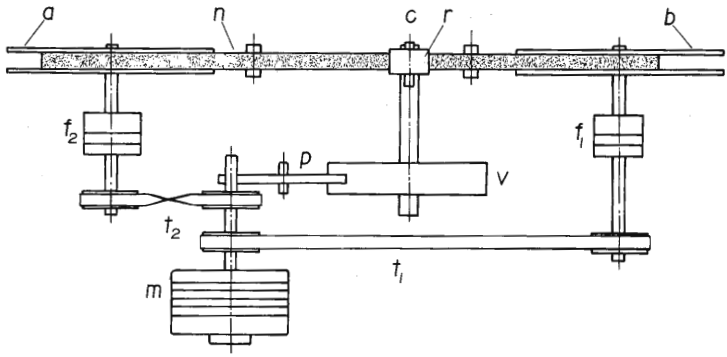


Fig. XI.19 - La trasmissione del movimento dal motore al capstan e alle bobine. Il motore m *trasmette la rotazione, attraverso la puleggia* p, *al volano* v *a cui è solidale il capstan. La bobina raccoglitrice* b *riceve una coppia motrice dal motore stesso tramite la cinghia* t_1 *e il dispositivo a frizione* f_1. *Alla bobina erogatrice* a *è applicata una coppia frenante attraverso la cinghia incrociata* t_2 *e il dispositivo a frizione* f_2. n *è il nastro; il suo trascinamento è determinato dal capstan* c, *contro cui il nastro è stretto dal rullo di gomma* r.

È prevista anche la possibilità di accoppiamento rigido, in modo da permettere l'avanzamento e il ritorno rapido del nastro.

2) *Registratori a tre motori.*

È la soluzione migliore, in quanto consente di eliminare cinghie e pulegge. Un motore trasmette il movimento al capstan; le bobine sono montate direttamente sugli alberi di due altri motori. Marcia normale, avanzamento e ritorno rapido, frenatura delle bobine sono ottenute elettricamente: una tensione alternata ridotta consente di avere sull'asse una debole coppia motrice, che permette lo slittamento; con una debole tensione continua si ha un'azione di frenatura; l'alimentazione alla tensione nominale dà luogo alla marcia rapida; una tensione continua più elevata della precedente permette la frenatura rapida.

XI.3. Processi di registrazione e di lettura

Prima di analizzare il modo con cui si realizza la registrazione del segnale sul nastro e si effettua la lettura, si premettono alcune considerazioni sul magnetismo, per meglio comprendere i fenomeni magnetici connessi col funzionamento del registratore.

1) *I fenomeni magnetici, il nastro e la testina.*

Il nastro magnetico è un nastro di plastica, con una facciata rivestita di materiale magnetico polverizzato, di solito ossido di ferro. Le molecole di ossido di ferro si riuniscono in gruppi, chiamati elementi cristallini, di dimensioni dell'ordine dei μm; a loro volta questi si riuniscono in gruppi, chiamati domini o magnetini elementari, il cui comportamento è analogo ad una barretta magnetica. Nel caso in cui il materiale è completamente smagnetizzato, i vari domini risultano orientati in modo casuale e perciò non si ha effetto magnetico esterno (fig. XI.20 a). Se invece si applica un campo magnetico uniforme o

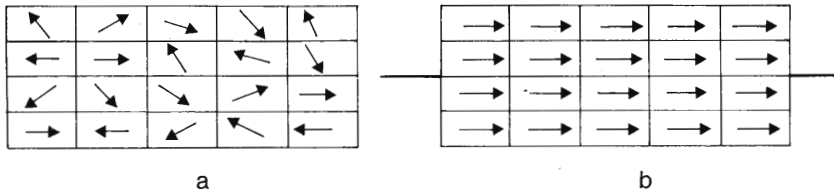


Fig. XI.20 - I domini magnetici nei casi di: a) *materiale smagnetizzato e* b) *materiale magnetizzato.*

forza magnetizzante al materiale, i magneti elementari si orientano secondo la direzione del campo e il materiale appare magnetizzato (fig. XI.20 b).

Nel caso del nastro, se la forza magnetizzante varia ciclicamente, varia la magnetizzazione e la curva che si ottiene è il cosiddetto ciclo di isteresi. Partendo dal materiale smagnetizzato, se si applica un campo magnetico H crescente mediante una corrente che percorre una bobina, l'induzione magnetica cresce non linearmente, ma secondo una curva ad S. Aumentando ulteriormente la corrente e perciò H, si arriva alla saturazione, cioè ad una situazione ($H = H_s$) oltre cui B rimane sensibilmente costante, in quanto i magneti elementari sono tutti orientati. Se a questo punto si diminuisce il campo H fino ad annullarlo, si nota come il materiale rimanga magnetiz-

zato: B_r indica l'induzione residua; per annullarla, occorre applicare un campo magnetico in senso opposto H_c, detto campo coercitivo, come si vede in fig. XI.21 (il significato di H e B è quello consueto in campo tecnico).

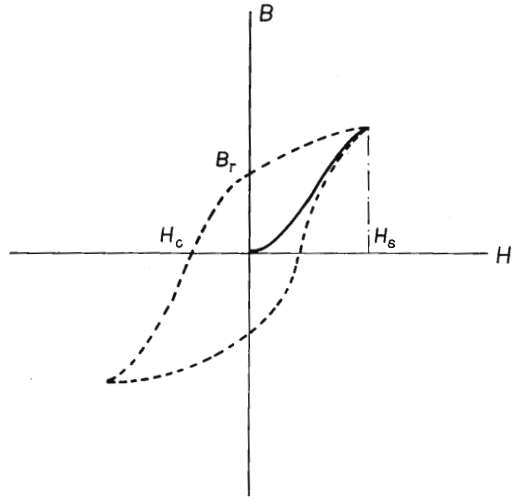


Fig. XI.21 - Il ciclo di isteresi.

Nel caso del registratore l'ossido di ferro del nastro è soggetto, nell'intervallo di tempo in cui è in corrispondenza della testina, al campo magnetico prodotto dalla stessa e perciò viene magnetizzato; allontanandosi dalla testina, il campo si riduce a zero, però il nastro rimane magnetizzato (induzione residua).

Un esempio di testina è dato in fig. XI.22.

Il nucleo 2 è di materiale ad alta permeabilità (permalloy); su di esso è avvolta una bobina 3 in cui, nel caso della registrazione, passa la corrente fonica che si vuole registrare; la bobina in figura è divisa in due parti avvolte in modo tale da generare due flussi concordi nel circuito magnetico e non essere influenzata da disturbi. Il traferro in alto 4, riempito di materiale non magnetico, serve a far sì che le linee del campo creato dalla bobina passino attraverso il nastro 1; infatti le linee del campo trovano un percorso di minore riluttanza attraverso il nastro magnetico che attraverso il traferro (fig. XI.23). Il traferro in basso 5, di dimensioni maggiori nelle testine che servono solo alla registrazione, introduce un tratto di elevata riluttanza, il cui effetto è di impedire che la permeabilità, cioè il rap-

porto *B/H,* diminuisca al crescere della corrente magnetizzante, con conseguente distorsione.

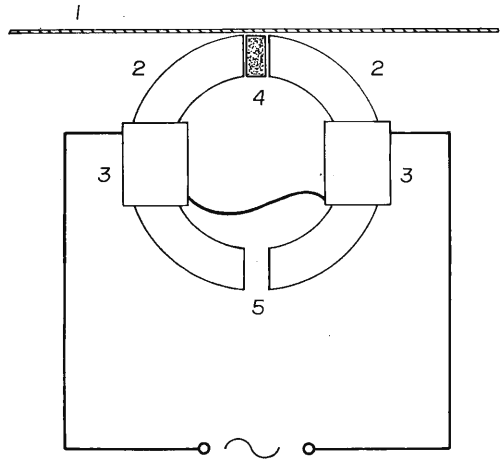


Fig. XI.22 - Schematizzazione di una testina.

2) *La cancellazione.*

Uno dei vantaggi dell'uso del nastro magnetico consiste nella possibilità di cancellare una registrazione presente e riutilizzarlo per una nuova. La cancellazione si effettua inviando alla bobina di un'apposita testina un segnale ad una frequenza compresa di solito fra 50 e 150 kHz. Il nastro, passando di fronte al traferro, è soggetto

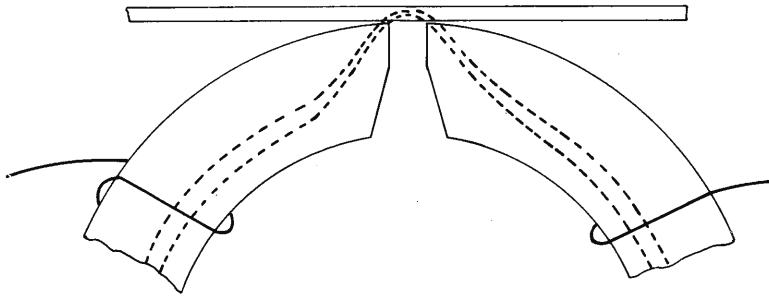


Fig. XI.23 - Andamento delle linee del campo creato dalla bobina durante la registrazione.

a un campo magnetico alternato, di ampiezza crescente mentre si avvicina al centro del traferro e di ampiezza progressivamente decrescente, fino ad annullarsi, mentre si allontana. L'induzione magnetica *B* ha un andamento come in figura XI.24, da cui si vede che il nastro, lasciato il traferro, cioè quando il campo è diventato nullo, risulta smagnetizzato.

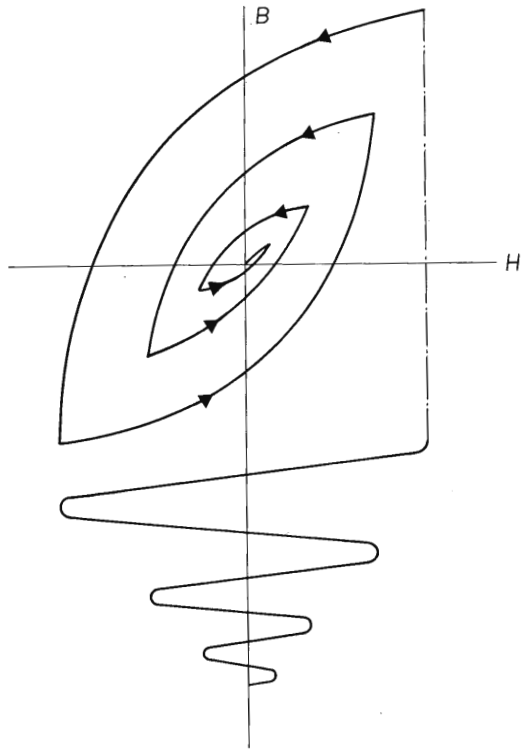


Fig. XI.24 - La cancellazione del segnale registrato.

3) *La registrazione.*

La corrente fonica, che corrisponde al segnale audio che si vuole registrare, è inviata alla bobina della testina di registrazione; questa genera un campo che magnetizza il segmento di nastro che si trova, in quell'istante, di fronte al traferro. Il nastro risulta perciò più o meno magnetizzato, in funzione della corrente fonica. Un esempio è dato in fig. XI.25. Si noti come il nastro possa essere conside-

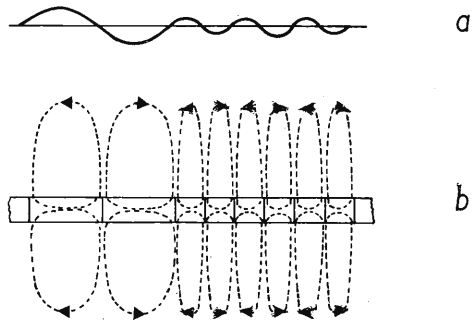


Fig. XI.25 - La registrazione. La figura b) *rappresenta l'andamento dell'induzione magnetica lungo il nastro, quando alla testina sia stato applicato il segnale* a).

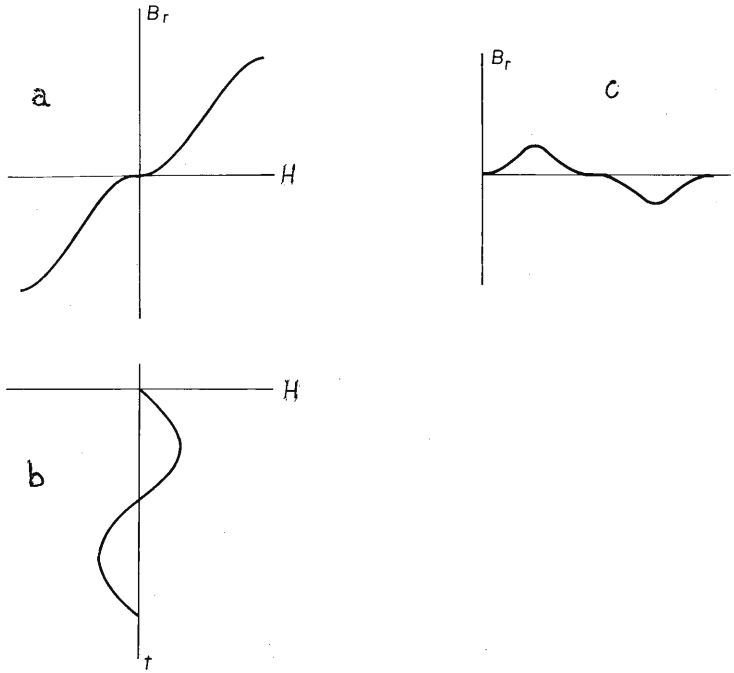


Fig. XI.26 - L'induzione residua B_r *in funzione del campo* H *(curva a). Si noti come, se la corrente fonica e perciò il campo sono sinusoidali (curva b), l'induzione residua, e cioè la magnetizzazione del nastro, non siano corrispondentemente sinusoidali, ma si abbia una forte distorsione (curva c).*

rato una successione di magneti lungo ciascuno mezza lunghezza d'onda registrata, pari allo spostamento del nastro in un semiperiodo.

Siccome ogni segmento di nastro è soggetto al campo solo quando si trova in corrispondenza del traferro, ciò che interessa è l'andamento dell'induzione residua dovuta al campo che si ha allo istante in cui traferro e segmento di nastro si trovano affacciati.

La curva è data in fig. XI.26; si noti la mancanza di linearità e perciò la forte distorsione all'uscita; inoltre se il campo è debole (piccoli segnali), l'induzione è quasi nulla.

Per evitare questi inconvenienti, si ricorre ad un segnale di premagnetizzazione (bias), di frequenza compresa tra 50 e 150 kHz, che viene sovrapposto al segnale audio. Come si vede in fig. XI.27, l'inviluppo del segnale somma si trova in corrispondenza dei tratti lineari della curva, quindi l'andamento dell'inviluppo B_r è simile a quello di H; quando il nastro lascia il traferro, l'induzione netta che rimane è il valore medio $\overline{B}_r$ che è simile al segnale audio originale.

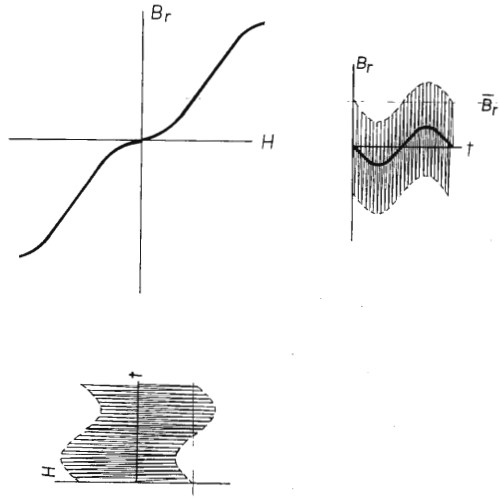


Fig. XI.27 - La premagnetizzazione del nastro.

L'ampiezza del segnale di premagnetizzazione deve essere scelta opportunamente, in modo da minimizzare la distorsione, senza però peggiorare eccessivamente il rapporto segnale/disturbo.

Talvolta esiste una testina di premagnetizzazione separata dalla testina di registrazione: è il cosiddetto sistema a campi incrociati che offre il vantaggio di una banda di frequenza più estesa.

4) *La lettura o riproduzione.*

Si è visto come il nastro magnetizzato possa essere considerato una successione di magneti. Nella fase di lettura, allorché un magnete si trova in corrispondenza del traferro, le linee del campo creato dal magnete stesso tendono a chiudersi attraverso il nucleo della testina, che offre un percorso di riluttanza inferiore al traferro (fig. XI.29 a). Si ha perciò un flusso concatenato con la bobina avvolta sul nucleo. Tale flusso varia nel tempo in conseguenza dello spostamento del magnete, si annulla e si inverte quando il magnete successivo ha preso il posto del primo. In conseguenza delle variazioni di flusso, si manifesta una forza elettromotrice ai capi della bobina; essa è tanto maggiore quanto più grande è la variazione di flusso e tanto più rapidamente tale variazione avviene. In conclusione si ottiene una forza elettromotrice che è funzione della magnetizzazione del nastro e quindi del segnale acustico registrato.

XI.4. La correzione della curva di risposta

Se si incide il nastro con segnali di ampiezza costante ma di frequenza diversa nel campo da 20 Hz a 20 kHz e si passa alla lettura, si nota come la tensione d'uscita non sia costante, ma sia minore alle basse e alte frequenze; l'andamento è illustrato in fig. XI.28.

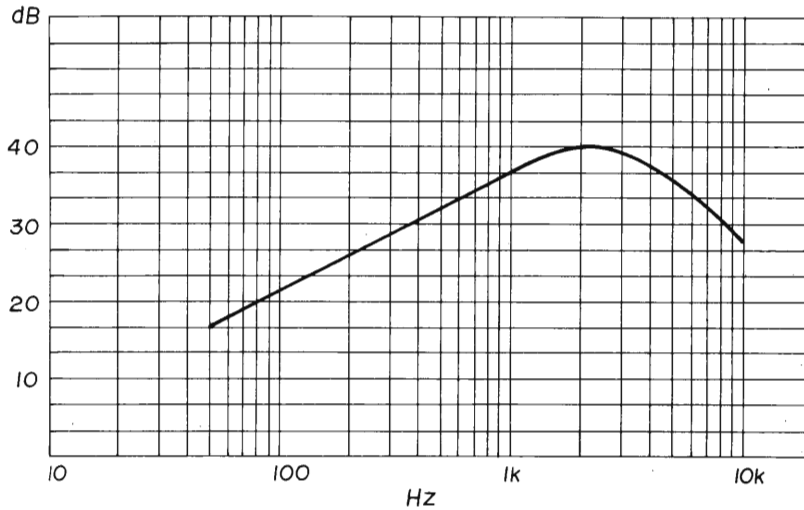


Fig. XI.28 - Diagramma della tensione che si ottiene durante la fase di lettura di un nastro non corretto.

Il tratto rettilineo iniziale è giustificato dal fatto che la tensione ai capi della testina di lettura è direttamente proporzionale alla variazione di flusso e inversamente proporzionale all'intervallo di tempo in cui si ha tale variazione. Maggiore è la frequenza, minori sono le dimensioni dei magneti di cui si può pensare costituito il nastro e minore è l'intervallo di tempo che deve trascorrere perché il flusso si inverta; la tensione ai capi della bobina è perciò più alta. L'aumento di tensione d'uscita è di 6 dB per ottava: la tensione raddoppia se la frequenza raddoppia, sempre a parità di ampiezza del segnale registrato. Alle frequenze molto basse, come si vede in figura XI.29 b, i magneti sono di notevole lunghezza rispetto alle dimensioni della testina; il flusso ha l'andamento disegnato e perciò diminuisce il flusso utile, cioè concatenato con la bobina, con una conseguente, ulteriore riduzione della tensione di uscita.

Per quanto riguarda il comportamento alle alte frequenze, si noti (fig. XI.28) come la tensione diminuisce, contrariamente a quanto si è detto in base alla legge dell'induzione elettromagnetica. Ciò è causato da vari fattori: in primo luogo si deve considerare la lunghezza del traferro; quando infatti la lunghezza d'onda del segnale inciso è circa uguale alle dimensioni del traferro, si ha la presenza simultanea di due magneti nel traferro stesso (fig. XI.30); siccome i

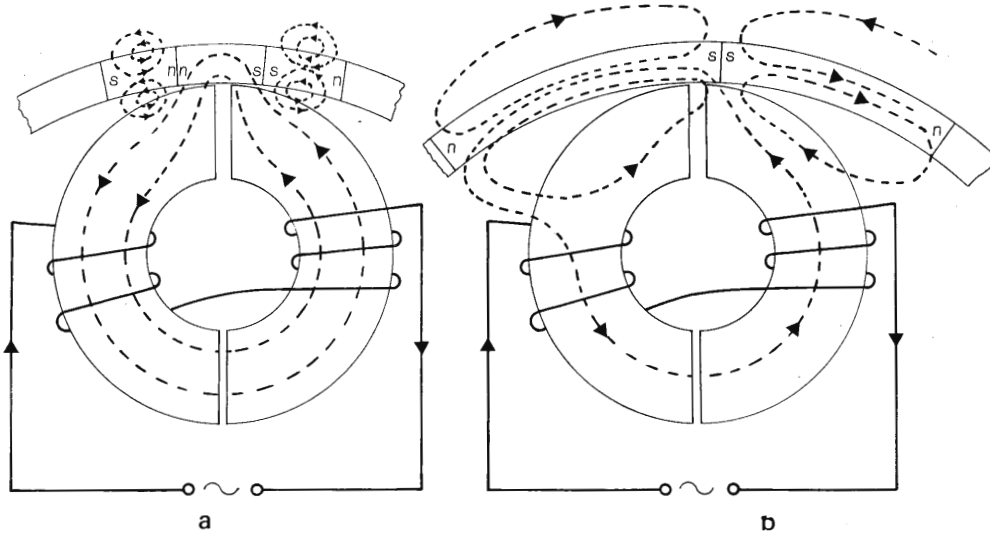


Fig. XI.29 - La lettura del nastro. Andamento del campo alle frequenze medie (a) *e basse* (b).

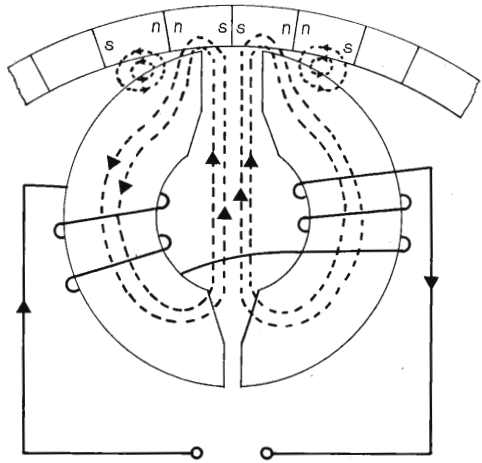


Fig. XI.30 - La lettura del nastro. Andamento del campo alle alte frequenze.

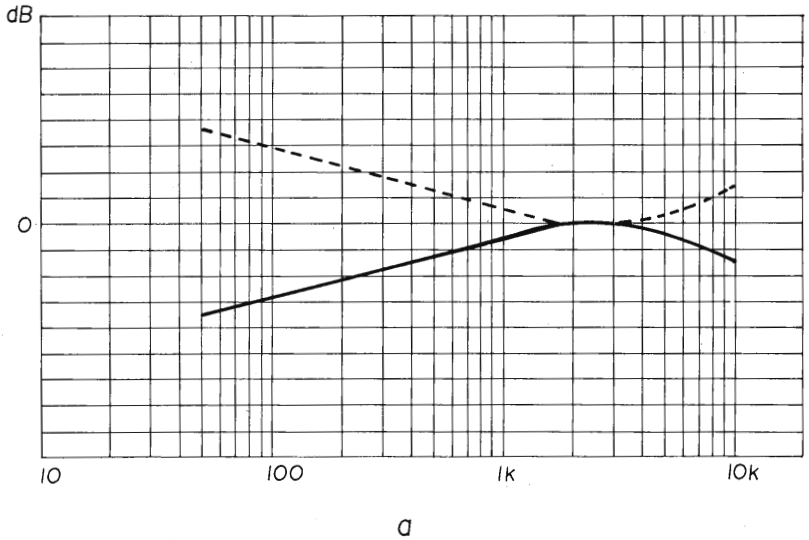
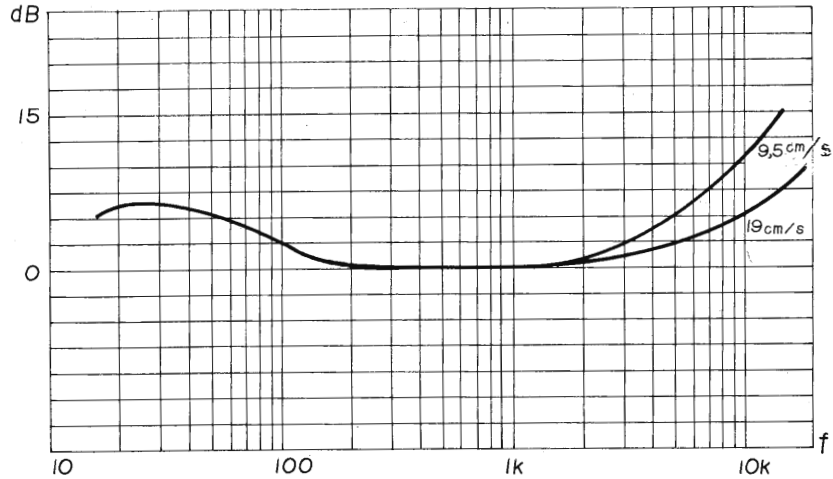
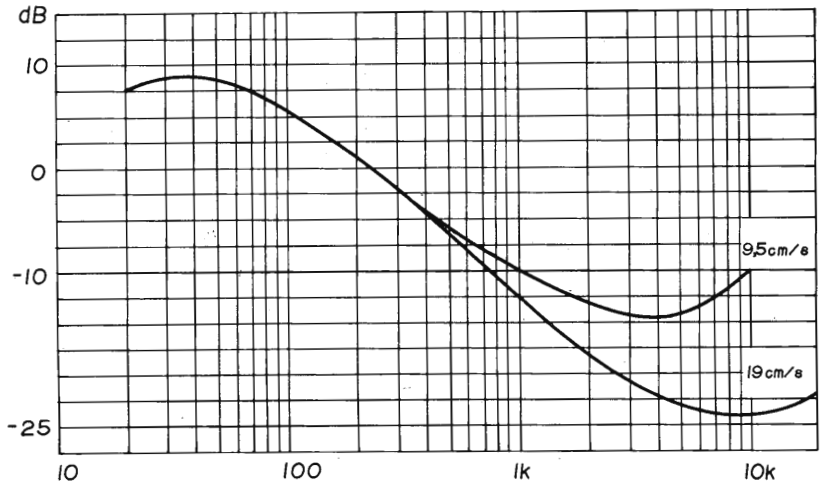


Fig. XI.31 - La correzione della curva di risposta.

a) *La curva di risposta degli amplificatori (tratteggiata nel disegno) è complementare della curva di risposta ottenuta dalla lettura di un nastro senza correzioni (linea a tratto continuo).*



b_1



b_2

Fig. XI.31.

b_1) *la correzione effettuata in registrazione (accentuazione delle frequenze alte);*
b_2) *la correzione effettuata in fase di lettura (accentuazione delle frequenze basse).*

segmenti di nastro hanno i poli adiacenti uguali, le variazioni di flusso magnetico si compensano e la tensione d'uscita è nulla.

Generalizzando queste considerazioni, si può dire che al crescere della frequenza, quando le dimensioni del magnete incominciano ad essere dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni del traferro, ha influenza il campo dei magneti contigui a quello che è in corrispondenza del traferro; dato che magneti contigui hanno polarità opposte, il risultato è un indebolimento del flusso e perciò una diminuzione della tensione d'uscita. I rimedi possibili per aumentare la frequenza a cui comincia a manifestarsi il fenomeno sono: diminuire la lunghezza del traferro e aumentare la velocità di trascinamento del nastro.

Una seconda causa di diminuzione della risposta alle frequenze alte è la smagnetizzazione spontanea del nastro. Ogni magnete di cui si può pensare costituito il nastro si trova contiguo a magneti aventi polarità opposte e che perciò generano un campo che provoca un effetto smagnetizzante sul magnete considerato. Questo fatto si manifesta in misura più notevole alle alte frequenze, in quanto in corrispondenza di esse i magneti sono di lunghezza inferiore, e perciò più facilmente soggetti a reciproche influenze.

Infine si devono considerare lo spessore della regione magnetica e la distanza fra nastro e testina; la loro influenza si fa sentire particolarmente al crescere della frequenza, sempre a causa delle ridotte dimensioni dei magneti. Per una buona risposta lo spessore dello strato magnetico deve essere piccolo e il nastro deve essere mantenuto a contatto della testina.

Malgrado gli accorgimenti accennati, la risposta dipende dalla frequenza; si ricorre allora a una compensazione elettrica. Si fa in modo cioè che gli amplificatori di cui è dotato il registratore abbiano una curva di risposta che sia complementare della curva di fig. XI.28; si veda la fig. XI.31 a. Si agisce o nella fase di registrazione o nella fase di lettura o in entrambe. In pratica la compensazione in frequenza si effettua in entrambe le fasi, come illustrato in fig. XI.31 b_1, b_2.

Curve tipiche di risposta dopo la correzione sono rappresentate in fig. XI.32. Si richiede che la risposta da 40 Hz a 15 kHz non vari di più di $\pm$ 2 dB, per velocità del nastro di 9,5 cm/s; se la velocità è di 19 cm/s, la banda deve estendersi fino a 18 kHz.

XI.5. Schema tipo di un registratore

Uno schema tipo di un registratore è rappresentato in fig. XI.33. Si notano l'oscillatore a frequenza ultrasonica 1, il cui compito

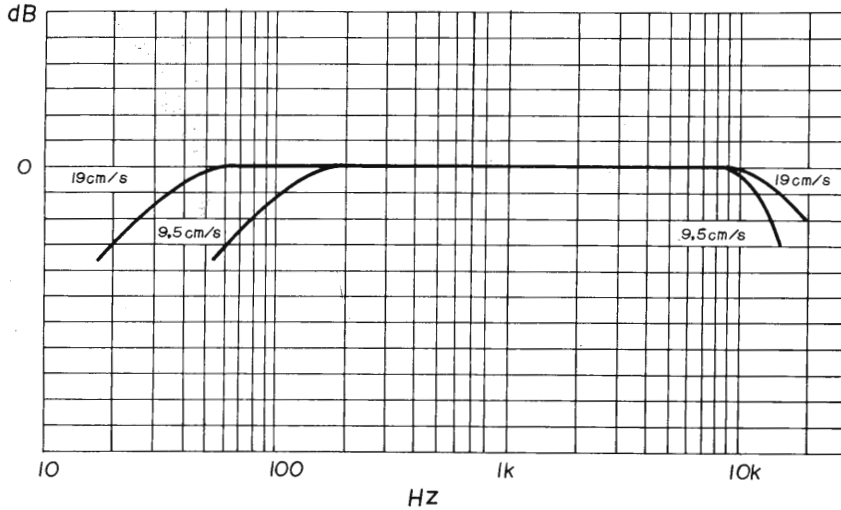


Fig. XI.32 - Curve di risposta di un registratore.

è di fornire il segnale di cancellazione e di polarizzazione, rispettivamente alle testine di cancellazione *C* e di registrazione *D*.

I preamplificatori 2 e 3 hanno lo scopo sia di aumentare il livello del segnale sia di effettuare la correzione di cui si è parlato.

La testina di lettura *E* durante la fase di registrazione può servire come controllo del segnale effettivamente registrato (monitoring).

In altri schemi il preamplificatore è unico e la testina di registrazione serve anche come testina di lettura; le prestazioni sono però inferiori.

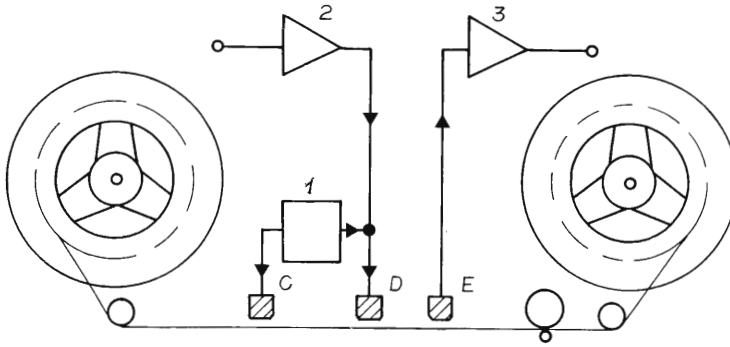


Fig. XI.33 - Schema tipo di un registratore.

In fig. XI.34 si vede un registratore a bobine di alta qualità.

Fig. XI.34 - Registratore Revox A 700 (da Audiovisione).

XI.6. Il rumore e la sua riduzione

Diverse sono le cause di rumore in un registratore. Vediamo di elencare le principali.

1) L'apparato di registrazione e di lettura, che ha un rumore proprio, indipendentemente dal movimento del nastro.

2) La natura discontinua, non uniforme dello strato magnetico: questo è costituito infatti da particelle di ossido.

3) Un'eventuale asimmetria del segnale di premagnetizzazione.

4) Magneti o solenoidi vicini al registratore, che possono produrre disturbi soprattutto a bassa frequenza.

5) Strati contigui di nastro avvolti sulla bobina possono influenzarsi reciprocamente, producendo magnetizzazioni non desiderate.

6) Il distacco temporaneo del nastro dalla testina, causato da imperfezioni costruttive.

Le considerazioni sul rumore sono importanti in quanto un segnale è avvertibile solo se non è coperto dal rumore. Nel caso della alta fedeltà si richiede che il rapporto segnale/rumore sia al minimo di 50 dB, se la velocità del nastro è 9,5 cm/s, e di 55 dB se la velocità del nastro è di 19 cm/s. È quindi importante ridurre il rumore. Da notare che il rumore dipende dalla velocità di trascinamento del nastro, aumentando quanto più la velocità è bassa; si fa particolarmente sentire nei registratori a cassette, in cui la velocità del nastro è 4,75 cm/s.

Il criterio spesso usato nei dispositivi di riduzione del rumore è quello della compressione-espansione del segnale.

Nella fase di registrazione si amplificano maggiormente (espansione) le frequenze medie e alte; il rumore in assoluto rimane lo stesso, però ora è ben al di sotto del segnale utile; nella fase di lettura, per ottenere il segnale originale, si devono attenuare corrispondentemente le frequenze che si erano espanse (compressione): nello stesso rapporto è perciò ridotto anche il rumore.

I sistemi più usati sono il Dolby, nella versione B, e il DNL.

1) *Il sistema Dolby B.*

Sulle frequenze basse, fino a circa 400 Hz, non viene effettuata alcuna operazione. Sulle frequenze medie e alte si agisce invece in due modi durante la registrazione: 1) le si amplifica in misura maggiore quanto più è alta la frequenza; 2) a parità di frequenza, la espansione non è fissa, ma dipende dall'ampiezza del segnale: più il segnale è debole, maggiore è l'amplificazione, in quanto maggiore è la probabilità che il segnale sia sommerso dal rumore. L'intervento, o espansione, perciò è funzione sia della frequenza sia dell'ampiezza del segnale che si vuole registrare. Un processo inverso avviene durante la fase di lettura. In fig. XI.35 sono rappresentate le curve di espansione e di compressione.

In fig. XI.36 si vede lo schema a blocchi del sistema Dolby. Durante la fase di registrazione il circuito G_1 tratta i segnali come si è detto; essi, mediante il sommatore, vengono sommati al segnale principale, così sono espansi i segnali deboli e al di sopra di una determinata frequenza. Durante la fase di lettura, il circuito G_2 compie le stesse operazioni, però questa volta i segnali così trattati vengono

sottratti; in conclusione le frequenze medie e alte ritornano al livello originario.

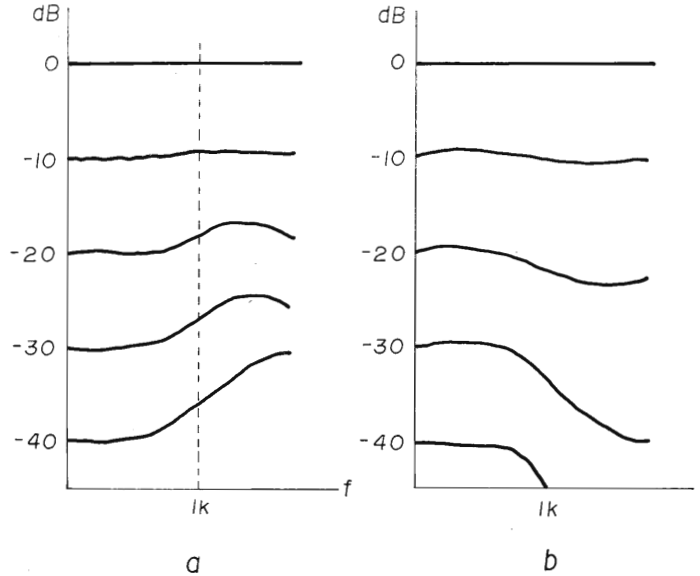


Fig. XI.35 - Sistema Dolby B: curve di espansione a) *e compressione* b).

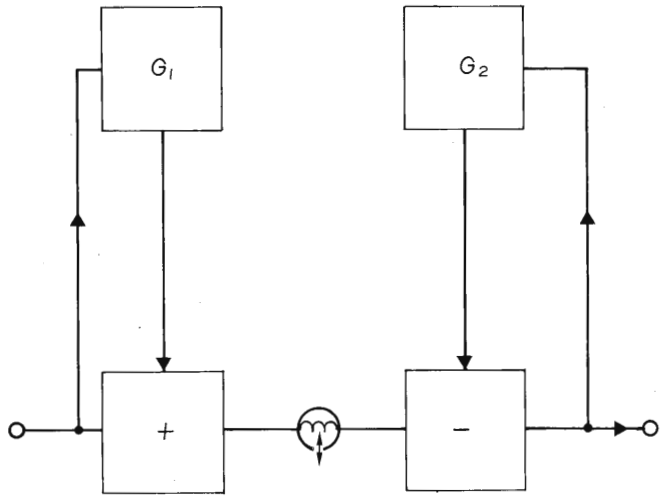


Fig. XI.36 - Sistema Dolby: schema a blocchi.

2) *Il sistema DNL (Dynamic Noise Limiter).*

La banda audio è divisa in due parti, con frequenza di crossover 5 kHz; i segnali a frequenza inferiore a 5 kHz sono trasmessi integralmente all'uscita; i segnali a frequenza superiore, mediante un filtro, sono attenuati tanto più quanto la frequenza è alta e il segnale è debole. In fig. XI.37 è rappresentato il suddetto modo di trattamento dei segnali.

Lo schema a blocchi del sistema DNL è riportato in fig. XI.38.

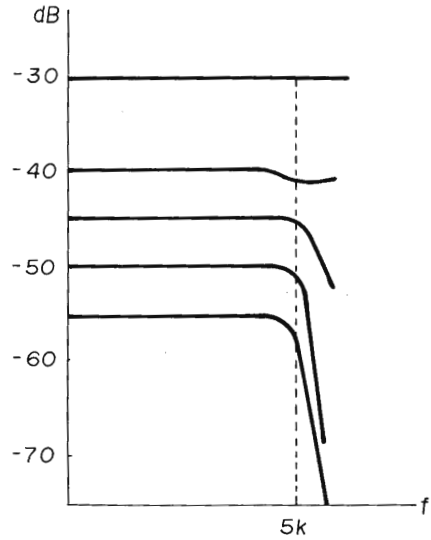


Fig. XI.37 - Sistema DNL. L'attenuazione dei segnali in funzione dell'ampiezza e della frequenza.

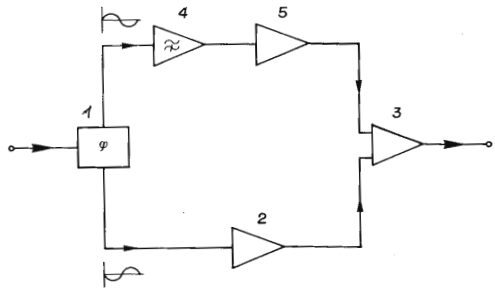


Fig. XI.38 - Il sistema DNL: schema a blocchi.

All'uscita dello sfasatore 1 si hanno due segnali in opposizione di fase: uno, attraverso un amplificatore a larga banda 2, è inviato al mescolatore d'uscita 3; l'altro passa invece attraverso un amplificatore-filtro passa alto 4 (frequenza di taglio 5 kHz) e un secondo amplificatore 5 che interviene solo quando l'uscita del primo è almeno di 40 dB al di sotto del livello di riferimento; nel mescolatore l'uscita dell'amplificatore 5 annulla l'uscita in alta frequenza e a basso livello dell'amplificatore a larga banda.

Il DNL dà risultati qualitativamente inferiori al Dolby; ha però il grosso vantaggio di poter essere applicato con maggior facilità: dato che interviene dopo la lettura del nastro, può essere inserito tra uscita del registratore e gli stadi amplificatori di un impianto Hi-Fi.

XI.7. Registratori a cassette e a cartucce

1) *Registratori a cassette.*

Un esempio è in figura XI.39.

In queste apparecchiature il nastro si trova alloggiato in contenitori di plastica detti cassette.

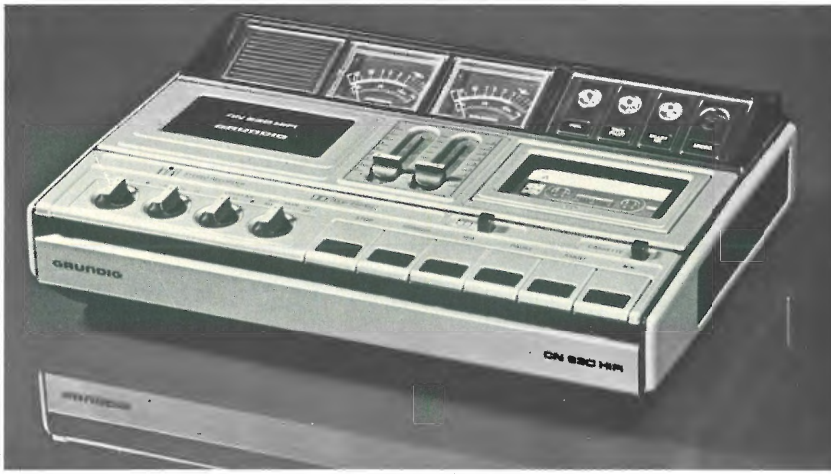


Fig. XI.39 - Registratore a cassette (Grundig CN 930).

Quando si mette in funzione il registratore, le due testine si spostano verso la cassetta; una molla e uno spessore di feltro permettono di ottenere un buon contatto tra nastro e testine. Il movimento

del nastro è determinato dal capstan, contro cui è premuto il nastro stesso da un rullo di gomma.

Il vantaggio dei registratori a cassette consiste nella facilità di sistemazione del nastro e di uso; non è necessario, come nei registratori a bobine, riavvolgere sempre tutto il nastro prima di rimuovere le bobine dopo l'ascolto.

Il nastro è alto 1/8″ ed è trascinato a bassa velocità: 4,75 cm/s.

Nel nastro monofonico si hanno due tracce su cui è riportata la registrazione; quando il nastro è finito, cioè è terminata la lettura di una traccia, si rivolta la cassetta e si legge l'altra traccia.

Nel nastro stereo le tracce sono quattro: in una prima fase ne vengono lette due (canale destro e canale sinistro); nella seconda fase, rivoltata la cassetta, si leggono le altre due. Un registratore mono può essere utilizzato per leggere, in monofonia, un nastro stereo; la testina infatti è alta quanto le due tracce stereo e quindi si ottiene ai suoi capi una tensione somma dei segnali sui due canali.

Le cassette vengono contraddistinte con le sigle C60, C90, C120; esse indicano che le durate sono, rispettivamente, di 60, 90 e 120 minuti.

Inconveniente dei registratori a cassette è la qualità, in genere non così buona come nei registratori a bobine: la traccia è stretta, la velocità è bassa, maggiore è l'influenza di wow e flutter e perciò il rapporto segnale/rumore è più basso.

Si richiede che: la velocità di trascinamento non si scosti dal valore normalizzato di più dell'1 %; le fluttuazioni non superino lo 0,2 %; la risposta non vari più di 2 dB da 40 Hz a 10 kHz; il rapporto segnale/rumore non sia inferiore a 50 dB in genere e a 45 dB se sono presenti sistemi di riduzione del rumore.

Esistono peraltro registratori a cassette di alta qualità, le cui prestazioni sono simili a quelle dei registratori a bobine; l'uso di nastri all'ossido di cromo, il sistema Dolby e meccanismi di trascinamento a due capstan hanno permesso di ottenere buoni risultati.

2) *Registratori a cartucce.*

Sono simili ai registratori a cassette, da cui si differenziano per il sistema di trascinamento, il tipo del nastro e la velocità di scorrimento. Il nastro è un anello continuo alto 1/4″ ed è trascinato alla velocità di 9,5 cm/s. Le tracce sono otto (quattro canali stereo) e sono lette secondo questo ordine: 1ª e 5ª; 2ª e 6ª; 3ª e 7ª; 4ª e 8ª.

La cartuccia non si rivolta; essendo il nastro continuo, alla fine del programma sono lette nuovamente le tracce 1ª e 5ª e successivamente le altre.

I registratori a cartucce non sono molto diffusi. Essi hanno il vantaggio di una più alta velocità rispetto ai registratori a cassette, quindi la risposta dovrebbe essere migliore; in pratica i registratori a cassette sono stati perfezionati, come si è visto, in misura tale da non avere prestazioni inferiori agli attuali registratori a cartucce. Un secondo vantaggio è di consentire una sonorizzazione senza interruzione di un locale, cosa che è permessa dalla continuità del nastro.

Diversi sono invece gli inconvenienti. In primo luogo la testina deve spostarsi di un tratto relativamente ampio per leggere le quattro doppie tracce, e questo può creare imperfezioni dell'allineamento fra testina e nastro, con conseguenti distorsioni. In secondo luogo vi è il problema meccanico di realizzare lo scorrimento continuo del nastro. Infine il fatto che il nastro abbia un movimento di avanzamento in un solo senso crea difficoltà alla ricerca di un brano: per rileggere un tratto di nastro appena letto, occorre far scorrere il nastro per tutta la sua lunghezza.

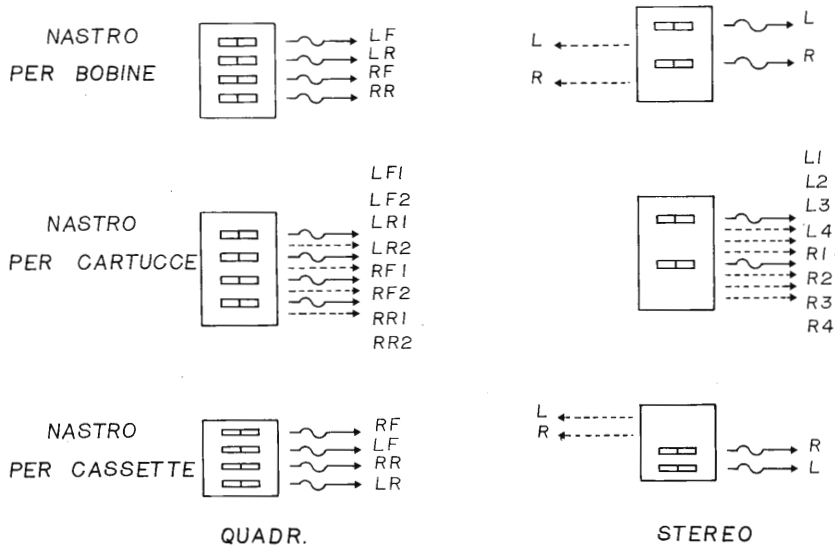


Fig. XI.40 - Disposizione delle tracce nelle registrazioni stereo e quadrafoniche.

Stereo: L) *left = canale sinistro;* R) *right = canale destro.*

Quadrafonico: LF) *left forward = canale sinistro anteriore;* LR) *left rear = canale sinistro posteriore;* RF) *right forward = canale destro anteriore;* RR) *right rear = canale destro posteriore.*

Le frecce indicano i versi di movimento del nastro durante la lettura. Indici uguali indicano tracce lette contemporaneamente; ogni traccia corrisponde a un canale.

XI.8. Costituzione e dimensioni del nastro

Il nastro è di acetato di cellulosa o di sostanze poliestere, con una faccia rivestita di materiale magnetico, generalmente ossido di ferro. Recentemente si è introdotto il biossido di cromo, che consente di ottenere una migliore risposta alla alte frequenze, esigenza che si ha soprattutto nei registratori a bassa velocità.

Le dimensioni sono normalizzate. In fig. XI.40 sono raffrontate le configurazioni delle tracce per registrazioni stereo e quadrafoniche.

CAPITOLO DODICESIMO

SCELTA E UTILIZZAZIONE DELLE APPARECCHIATURE HI-FI

Nei capitoli precedenti si è cercato di descrivere le caratteristiche dei vari elementi che interagiscono nella riproduzione sonora: ambiente, apparati elettromeccanici, ascoltatore, collegando tali caratteristiche alla esperienza sonora che ognuno ha acquisito o potrà acquisire. In questo capitolo vogliamo parlare delle prospettive dell'alta fedeltà e stabilire come procedere nella scelta di un impianto.

Le attuali tecniche elettroacustiche permettono di riprodurre suoni e illusioni dello spazio sonoro, che tendono ad imitare la realtà; noi riteniamo che, con esse, l'imitazione di panorami sonori reali non potrà mai eguagliare il modello. Al momento, l'obiettivo della tecnica elettroacustica è rivolto verso componenti e progetti di circuiti utilizzati nei vari campi dell'elettronica, per il miglioramento delle tecniche di registrazione e riproduzione sonora; mentre, per il futuro, la scienza elettroacustica sta studiando nuove norme di progetto dei vari apparati.

Infatti, per il presente, se la scienza elettroacustica ha stabilito delle norme di progetto (non ancora unificate) per realizzare le varie apparecchiature, la tecnica, compatibilmente alle limitazioni economiche, cerca di utilizzare componenti elettronici che sono da tempo in uso in altri settori dell'industria elettronica, in modo da concretizzare ciò che le norme di progetto richiedono. Facciamo un esempio. Alla 53ª A.E.S. (Manifestazione di Audio Engineering Society, a cui partecipano le personalità e le industrie più qualificate del settore audio) è stato presentato dalla Acoustic Research un'apparecchiatura denominata « programmed delay network » (circuito di ritardo programmato). Questo apparato, che nulla ha a che vedere con le attuali unità di riverbero, né con i sistemi quadrafonici, si basa sull'emissione di due segnali audio principali emessi da un tradizionale impianto stereofonico, e di sedici altri segnali audio emessi da altrettanti diffusori disposti attorno al punto d'ascolto, pilotati ognuno da un amplificatore da 10 W_{rms}, che riceve i segnali dal circuito di ritardo programmato.

Il circuito di ritardo programmato consente di ritardare a volontà il segnale inviato a ciascuno dei sedici diffusori secondari. Questa

emissione secondaria serve a ricreare riflessioni e riverberazioni, in modo da realizzare qualsiasi caratteristica acustica ambientale.

Con un tale procedimento, in quasi tutti i punti della sala di ascolto, rimane l'impressione dell'emissione frontale e si ha l'illusione di ascoltare in un ambiente geometricamente più ampio e con un giusto tempo di riverberazione. Il circuito di ritardo programmato è realizzato con memorie ad accesso casuale, come quelle usate nei computer digitali. Il massimo tempo di ritardo per i canali è di 250 ms, può comunque essere aumentato aggiungendo altri circuiti di memoria. Si può programmare il circuito in modo che simuli le caratteristiche di una sala da concerto reale. Per ottenere ciò, occorre conoscere: le caratteristiche acustiche dell'ambiente in cui si realizza la riproduzione sonora, le caratteristiche acustiche della sala da concerto che si vuole simulare, la disposizione degli strumenti nella sala, la posizione ottimale d'ascolto; questi dati vengono elaborati da un computer esterno al circuito di ritardo; il risultato dell'elaborazione permette di predisporre il circuito di ritardo programmato, e ottenere così la simulazione richiesta. Se invece si vuole correggere solamente il tempo di riverberazione dell'ambiente d'ascolto, basta operare con il solo circuito di ritardo.

Per il futuro si prevede una rivoluzione sul piano scientifico dell'elettroacustica, specie per ciò che riguarda le norme di progetto. Questa previsione è suggerita dalle scoperte che si stanno facendo nel campo della psicoacustica. Infatti risulta, dagli studi con illusioni uditive (vedi: Le Scienze n. 96: « Illusioni musicali » di Diana Deutsch), che vi sono differenze sostanziali fra esseri umani nel modo di percepire semplici sequenze tonali (toni collegati l'uno all'altro), quando subentrano differenti posizioni spaziali. Si è scoperto che le differenze nella percezione di sequenze tonali sono correlate con l'essere destro o mancino. Quindi, le variazioni nella percezione uditiva risultano, probabilmente, da differenze fra individui a un livello neurologico di base. Se si pensa che quando ascoltiamo della musica non udiamo semplicemente un insieme di toni indipendenti, ma sequenze tonali complesse, ed il cervello raggruppa ed organizza un insieme di stimoli tonali in tali combinazioni, si può ritenere che entrambi gli emisferi del cervello ricoprano ruoli importanti, e in qualche misura complementari, nella percezione musicale. Quindi, solamente dopo aver chiarito come l'essere umano percepisce il suono, si potrà dire quale importanza hanno determinati parametri oggettivi (vedi ad esempio la fase), e quali norme di progetto la tecnica deve seguire per la realizzazione di apparati elettroacustici.

Da queste considerazioni, e dopo quanto è stato detto nei ca-

pitoli precedenti, vediamo come procedere nella scelta e nella composizione di un impianto di riproduzione sonora.

Il problema più importante che si pone riguarda la scelta della coppia dell'amplificatore di potenza (o amplificatore, se si vuole una unità integrata) e diffusore. Le soluzioni sono diverse e tecnicamente tutte valide, ma ciascuna comporta una differente spesa.

I) Scelta dell'amplificatore di potenza indipendente dalle caratteristiche del diffusore e dell'ambiente.

Questa soluzione, poco conveniente a livello dilettantesco, è opportuna quando non si vuole essere condizionati sia dalle dimensioni dell'ambiente che dalla efficienza degli altoparlanti. Il costo di tale soluzione è elevato, perché comporta l'acquisto di un amplificatore di grande potenza e con caratteristiche professionali.

L'amplificatore, se stereofonico, denuncia ad esempio una potenza di 200 + 200 W_{rms}, o più, su carico resistivo di 8 ohm, in modo da poter utilizzare in grandi ambienti diffusori a bassa efficienza (80 dB). Inoltre, l'amplificatore deve presentare un alto grado di affidabilità d'uso, in modo da poter lavorare ventiquattro ore su ventiquattro. Un uso continuato mette a dura prova le caratteristiche termiche dell'amplificatore. Se per gli amplificatori a valvole le caratteristiche termiche hanno poca importanza, per gli amplificatori a transistori sono fondamentali, perché i parametri dei transistori risentono molto delle variazioni di temperatura; più alta è la temperatura e più evidenti sono le distorsioni che subisce il segnale. Un accorgimento adottato per il controllo della temperatura consiste nel dotare l'amplificatore di grandi dissipatori di calore e di sistemi di raffreddamento ad aria forzata mediante ventilatori. Se si sceglie un amplificatore di alta potenza, ci si deve garantire che l'amplificatore lavori bene anche a basse potenze, e quando diciamo basse potenze intendiamo millesimi di watt, in modo che se all'amplificatore si collegano diffusori ad alta efficienza (104 dB) e si opera in piccoli ambienti, non si manifestino le deprecate distorsioni d'incrocio.

II) Scelta dell'amplificatore di potenza in funzione delle caratteristiche dell'ambiente e dell'efficienza dei diffusori.

Questa soluzione, utile a livello dilettantesco, comporta aver prestabilito la scelta dei diffusori. Mediante la relazione (1), misurato il volume dell'ambiente, V, ed il tempo di riverberazione, T, si determina la potenza acustica, necessaria per riprodurre forti volumi sonori (100 Phon):

$$P_a = 16 \cdot 10^{-4} \cdot V/T \qquad (1)$$

Esempio: se il volume dell'ambiente è di 140 m^3 e il tempo di riverberazione è di 0,5 s, la potenza acustica necessaria sarà di 0,45 W. Stabilita la potenza acustica, si prende nota del valore di efficienza media, η % o dB, del diffusore e, mediante la relazione (2), si calcola la potenza elettrica, P_e in W_{rms}, che l'amplificatore deve erogare.

$$P_e = P_a \cdot 100/\eta\,\% \qquad (2)$$

Con riferimento all'esempio precedente, se si dispone di un diffusore con: impedenza nominale di 8 ohm, efficienza η % = 0,4 % (85 dB), potenza massima applicabile 120 W, l'amplificatore deve poter erogare la potenza di 113 W su 8 ohm. Mentre se il diffusore ha: efficienza η % = 1,6 % (91 dB), potenza massima applicabile 40 W, impedenza nominale di 8 ohm, l'amplificatore deve poter erogare la potenza di 28 W su 8 ohm. Anche per potenze non elevate, ricordiamo di verificare la distorsione dell'amplificatore alle basse potenze.

III) Scelta dei diffusori in funzione dell'amplificatore e dell'ambiente.

Questa soluzione, anch'essa conveniente a livello dilettantesco, è, riguardo i componenti elettroacustici, l'inversa della precedente. Essa comporta aver prestabilito la scelta dell'amplificatore e le caratteristiche dell'ambiente. Anche qui, misurato il volume ed il tempo di riverberazione, mediante la relazione (1) si determina la potenza acustica. Dal valore di potenza dell'amplificatore, mediante la relazione (2) si determina l'efficienza dei diffusori. Così, con riferimento all'esempio precedente, in cui la potenza acustica è di 0,45 W, considerando la potenza dell'amplificatore di 30 W su 8 ohm, si ha:

$$\eta\,\% = 0{,}45 \cdot 100/30 = 1{,}5\,\% \quad (90\ \text{dB})$$

Riassumendo, le caratteristiche elettriche del diffusore sono: impedenza nominale 8 ohm, potenza massima continua applicabile 30 W o più, efficienza media 1,5 %. Si noti che il valore di potenza acustica è stato determinato per volumi sonori di 100 Phon, di conseguenza il valore di efficienza del diffusore dovrebbe essere dato per tutte le frequenze udibili. Il valore medio di efficienza qui utilizzato è stato considerato come valore medio dei valori di efficienza alle varie frequenze.

I collegamenti fra amplificatore e diffusore, come è stato detto, non comportano accorgimenti particolari; l'unico intervento da fare è di inserire fra i due componenti un fusibile di protezione del tipo ritardato. Il valore approssimato di corrente, *I*, del fusibile può essere

determinato mediante la relazione:

$$I = \sqrt{P_e/4Z}$$

dove P_e è la potenza massima continua applicabile al diffusore e Z è la sua impedenza nominale.

Ad esempio, per il diffusore preso in esame, se la potenza massima è di 40 W, il valore di corrente sarà:

$$I = \sqrt{40/4 \cdot 8} = 1{,}12 \text{ A}$$

Molte persone fanno la scelta della coppia, diffusori amplificatore, considerando solamente le caratteristiche tecniche, credendo che dal loro confronto si possano determinare le qualità sonore dei componenti. Un tale metodo, talvolta, può portarle a scelte che non rispondono alle loro esigenze.

Ricordiamo che la valutazione delle qualità sonore del diffusore e dell'amplificatore è di carattere soggettivo, e la sola prova di ascolto, con diversi tipi di musica, possibilmente nell'ambiente in cui i componenti dovranno operare, è idonea a determinare le qualità sonore degli apparecchi. I parametri e le caratteristiche danno poche indicazioni sulle differenze timbriche, dato che non esistono ancora metodi oggettivi di misura correlati alla qualità della riproduzione sonora.

A conferma di ciò, riportiamo una interessante esperienza. In un ambiente di buone caratteristiche acustiche, con diversi tipi di diffusori, e diversi brani musicali, sono stati provati tre amplificatori, che chiameremo: Amplificatore I, II, III.

Le caratteristiche principali e i diagrammi di distorsione (fig. XII. 1-2-3) dei tre amplificatori sono fra loro comparabili, e sono:

Potenza massima d'uscita in W_{rms} alla frequenza di 1 kHz

Amplificatore I			Amplificatore II			Amplificatore III		
Impedenza carico	Potenza		Impedenza carico	Potenza		Impedenza carico	Potenza	
	CH. S	CH. D		CH. S	CH. D		CH. S	CH. D
4 Ω	60 W	60 W	4 Ω	130 W	130 W	4 Ω	60 W	60 W
8 Ω	110 W	110 W	8 Ω	120 W	120 W	8 Ω	50 W	50 W
16 Ω	60 W	60 W	16 Ω	110 W	110 W	16 Ω	30 W	30 W

Risposta in frequenza a 1 + 1 W, carico 8 Ω (fra 0 e — 1 dB)

Amplificatore I	Amplificatore II	Amplificatore III
20-30 kHz	7-100 kHz	10-30 kHz

Gli amplificatori I e III sono stati costruiti seguendo criteri di progetto molto simili, contrariamente all'amplificatore II. A giudizio di diverse persone, che hanno ascoltato gli amplificatori, le qualità sonore emerse sono:

Amplificatori I e III: suono pieno, limpido, selettività fra gli strumenti e fra le voci.

Amplificatore II: suono leggermente compresso in relazione alla potenza erogata dall'amplificatore, suono limpido, minore selettività degli amplificatori I e III.

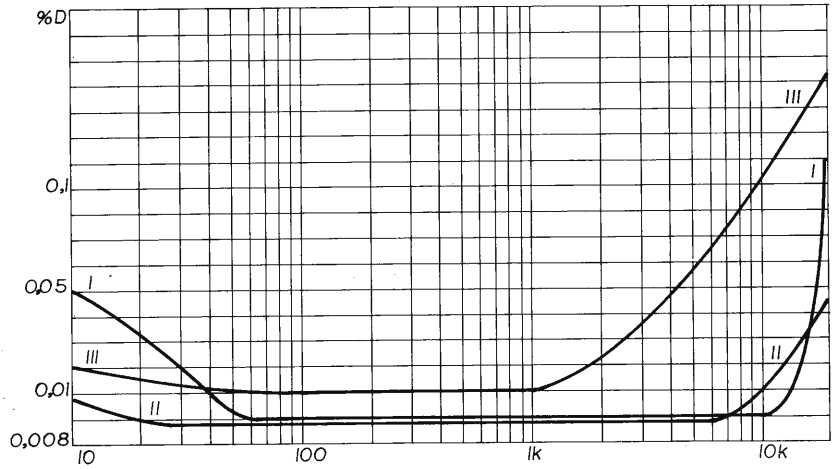


Fig. XII.1 - Distorsione armonica totale, alla potenza massima, in funzione della frequenza.

In particolare, quando l'amplificatore III era collegato a diffusori ad alta efficienza, la quantità di suono prodotta era equivalente a quella dell'amplificatore I. Infine, dal punto di vista commerciale, vi è poca differenza di prezzo fra i tre amplificatori.

Da quanto fino ad ora detto, si possono trarre le seguenti conclusioni:

1) Le attuali caratteristiche elettriche degli amplificatori permettono di stabilire quali valori sono necessari, ma non sufficienti, per-

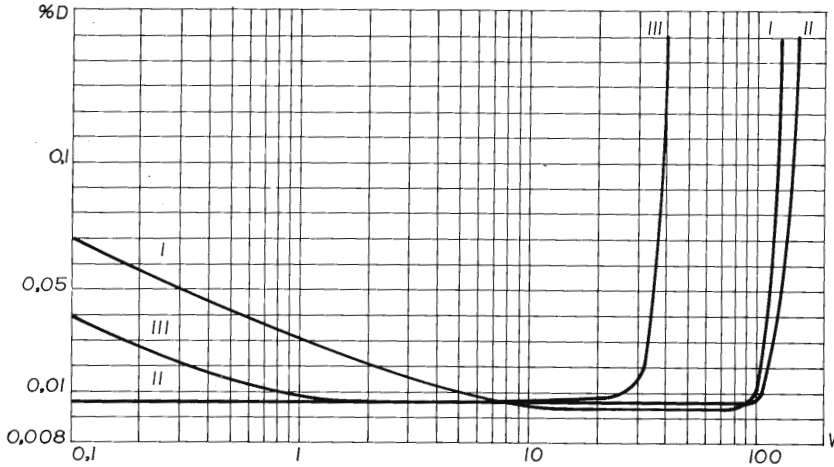


Fig. XII.2 - Distorsione armonica totale a 1 kHz in funzione della potenza.

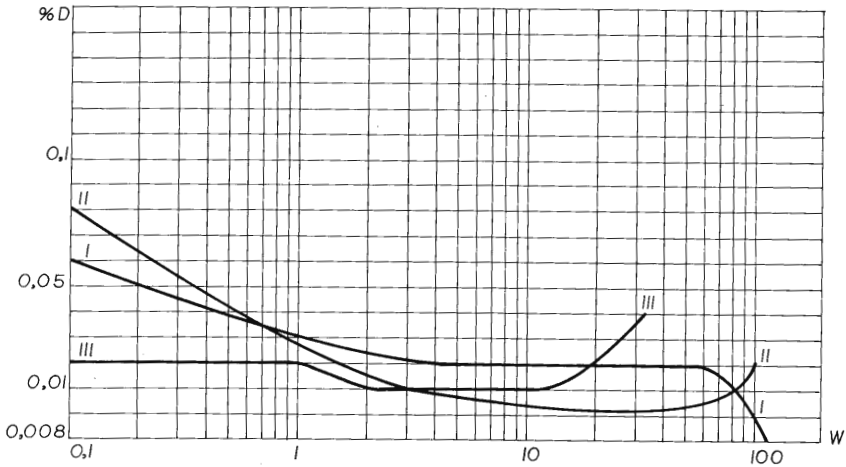


Fig. XII.3 - Distorsione d'intermodulazione totale in funzione della potenza.

ché un amplificatore possa essere considerato idoneo alla riproduzione fedele del suono; inoltre permettono di formare il corretto accoppiamento fra amplificatore e diffusori.

2) Con il solo confronto delle caratteristiche elettriche non si può stabilire la qualità timbrica di un amplificatore, ma se ne può avere solo una indicazione di massima.

3) Le qualità timbriche di un amplificatore si giudicano solo mediante prove di ascolto; si badi però che esse variano con il tipo di diffusore usato, con l'ambiente in cui avviene l'ascolto, con la qualità del programma sonoro inciso. Ciò porta a non quantizzare la qualità timbrica dell'amplificatore e a considerarla come caratteristica non oggettiva.

4) Si può affermare, in generale, che al di sotto di certi costi non si può realizzare un amplificatore appartenente alla categoria Hi-Fi.

Per quanto riguarda l'accoppiamento preamplificatore-amplificatore di potenza, si ricordi quanto è stato detto nel capitolo nono. Qui invece, vogliamo descrivere i comandi del preamplificatore e dare qualche consiglio sul modo di utilizzarli.

Fig. XII.4 - Pannello anteriore del preamplificatore MK16 (Galactron).

In fig. XII.4 è riportato il pannello frontale di un preamplificatore che, nella sua versione stereofonica, può essere considerato completo per quanto riguarda i comandi di controllo del segnale. Utilizzeremo tale figura per la descrizione dei comandi.

Come è stato già fatto, suddividiamo il preamplificatore in tre sezioni: sezione ingressi, sezione controlli, sezione uscite.

Sezione ingressi.

Questa sezione comprende cinque ingressi miscelabili; cioè, è possibile amplificare contemporaneamente e controllare indipendentemente cinque segnali stereofonici, provenienti da altrettante sorgenti (giradischi, sintonizzatori, microfoni, ecc.). Nel pannello posteriore sono localizzate le prese di connessione. Nel pannello anteriore, fig. XII.4, in basso a sinistra, sono localizzati i cinque cursori

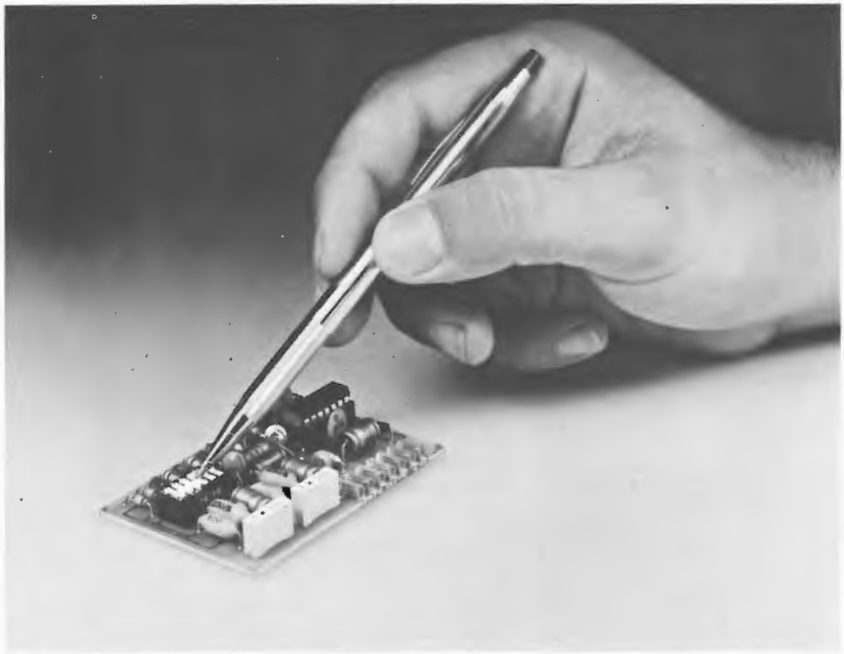


Fig. XII.5 - Preamplificatore universale 373 (Galactron).

che controllano l'ampiezza (livelli) dei segnali stereofonici. Ad ognuno di tali cursori, si può collegare un circuito amplificatore, fig. XII.5, che ha la possibilità di svolgere due distinte funzioni: preamplificazione lineare della banda audio, oppure preamplificazione equalizzata secondo la curva RIAA, con due diversi livelli di sensibilità per ognuna delle due funzioni. Ciò è stato ottenuto mediante una ta-

stiera, formata da sei tasti (la tastiera è indicata in fig. XII.5); così si può programmare il preamplificatore secondo il tipo di segnale da amplificare. Sopra ogni cursore (fig. XII.4) è posto un interruttore che permette di escludere completamente il corrispondente ingresso. Oltre questi cinque ingressi, nel pannello posteriore sono inseriti due prese per ingressi a bassa sensibilità (220 mV) utili per due registratori.

Sezione controlli.

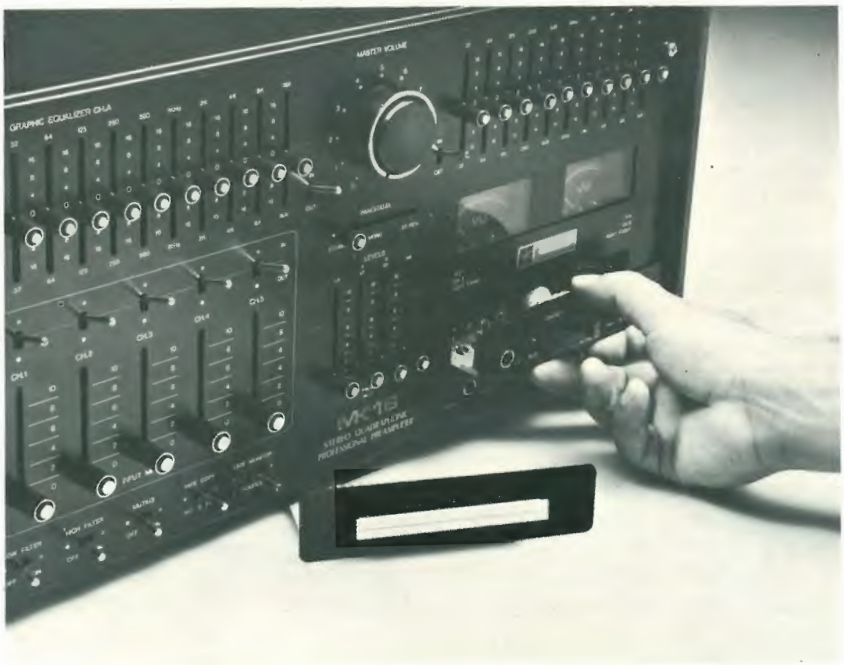
In questa sezione, sotto i cursori degli ingressi, sono localizzati gli interruttori: dei filtri passa alto (Low filter o Rumble); dei filtri passa basso (High filter o Scratch); del muting, che permette di ridurre il volume sonoro di 30 dB; del Tape Copy, che permette di riversare (copy) i segnali registrati da un registratore ad un altro registratore e viceversa; infine abbiamo il deviatore Tape Monitor, per l'ascolto (Monitor) dei due registratori (Tape). Questo comando permette di selezionare i segnali provenienti dalla sezione ingressi (Source) o da uno dei due registratori.

La sezione controlli è completata da comandi di volume-bilanciamento, dal comando dei toni, qui realizzato con un equalizzatore ambiente (Graphic equalizer).

Il controllo del volume è costituito da quattro cursori, posti in basso al centro del pannello anteriore, e da una manopola (Master volume) posta in alto al centro. La presenza dei quattro cursori per il volume è dovuta al fatto che si può controllare indipendentemente l'ampiezza dei segnali di quattro canali costituenti un programma quadrafonico. Ciò è possibile mediante l'aggiunta di un circuito decodificatore quadrafonico, fig. XII.6 a, che permette di ottenere la versione quadrafonica del preamplificatore.

Nella versione stereofonica del preamplificatore si utilizzano solo i due cursori contrassegnati con *A* e *B*, che controllano rispettivamente i segnali del canale sinistro e del canale destro (nella versione quadrafonica, i medesimi cursori controllano i canali anteriori: anteriore sinistro *LF*, e anteriore destro *RF*). Questa soluzione permette di realizzare il giusto bilanciamento sonoro fra i due canali stereo e di eliminare il comando separato del bilanciamento (balance), meno efficace. Il comando a manopola, master volume, controlla la azione del compensatore fisiologico del volume per entrambi i canali stereo. Quando la manopola è completamente ruotata in senso orario, l'effetto fisiologico è escluso e si ha il massimo volume sonoro; mano a mano che si ruota in senso antiorario avviene una graduale diminuzione di volume ed una accentuazione della compensa-

a



b

Fig. XII.6 - a) Decodifica quadrafonica (Galactron); b) inserzione della decodifica nell'apposito scomparto.

zione fisiologica. Quando la manopola è ruotata completamente in senso antiorario, si ha il volume sonoro attenuato di circa 30 dB e la compensazione fisiologica dei bassi e degli acuti, adeguata a tale livello sonoro, permette di percepire l'intera banda audio.

Il controllo dei toni è realizzato con un equalizzatore a bande d'ottava, formato da dieci cursori per il canale sinistro e dieci cursori per il canale destro. L'equalizzatore è posto in alto sul pannello anteriore, ai lati del master volume. Esso è corredato di due interruttori, uno per ciascun canale, che permettono l'esclusione dell'equalizzazione. Con un tale equalizzatore, mediante i dischi di rumore rosa e un fonometro, si può equalizzare l'ambiente d'ascolto, eliminando sufficientemente le più evidenti imperfezioni acustiche. Spesso però l'equalizzatore viene usato per risolvere problemi audio contingenti, come ad esempio compensare le attenuazioni e le esaltazioni di bande di frequenze audio dei programmi sonori registrati; esaltando o attenuando il suono caratteristico di determinati strumenti.

Sezione uscite.

La sezione uscite è composta: dall'uscita principale (Main Out); dalle uscite dei registratori 1 e 2. Le prese di tutte queste uscite sono poste sul pannello posteriore; mentre: l'uscita della cuffia, gli strumenti indicatori del livello d'uscita, il comando di blending (miscelazione dei canali stereo), sono posti sul pannello anteriore. Il comando di blending, posto fra i cursori di livello e il master volume, è formato da un cursore che permette il passaggio in maniera continua dall'effetto stereo all'effetto stereo reverse (canali stereo invertiti) attraverso la miscelazione dei due canali, posizione mono. Gli strumenti indicatori del livello d'uscita possono essere utilizzati con due diverse sensibilità: la prima, corrispondente alla posizione test del relativo commutatore, è quella nella quale lo 0 dB della scala corrisponde ad una tensione d'uscita pari a 0,775 V alla frequenza di 1.000 Hz; la seconda, corrispondente alla posizione Oper. del commutatore, esalta la sensibilità degli indicatori di circa 8 dB. La presa d'uscita per la cuffia permette il collegamento con una cuffia la cui impedenza è di 600 Ω; valori di impedenza più bassi non sono consentiti. Chiude la serie dei comandi l'interruttore di alimentazione elettrica (Power).

Per quanto riguarda la scelta e l'accoppiamento delle sorgenti sonore: giradischi, sintonizzatori, registratori, microfoni, ecc., possiamo prendere in considerazione le caratteristiche elettromeccaniche e con il loro confronto decidere la scelta. L'accoppiamento fra pream-

plificatore e sorgenti deve essere eseguito correttamente utilizzando cavi schermati e connettori adeguati, facendo attenzione alle saldature e alle prese di massa.

Concludiamo ricordando che le prestazioni delle apparecchiature per la riproduzione del suono sono fortemente influenzate dall'acustica dell'ambiente, e che la riproduzione fedele del suono richiede che tutti i componenti che la realizzano siano di pari qualità.

INDICE ALFABETICO

A

Adattamento fonorivelatore-amplificatore, 141
— diffusore-amplificatore, 142
AFC, 172
Altezza dei suoni, 3; 36
Altoparlante a bobina mobile, 103
— elettrostatico (a condensatore), 112
— ionofonico, 113
— a nastro, 110
— pneumatico ESS, 111
Ampiezza, 4
Analisi armonica, 5
Angolo di tracciatura, 99
Antenna, 169
Antiskating, 79
Area di assorbimento equivalente A, 21
Attrito orizzontale e verticale del braccio, 67
— del braccio - misura, 68

B

Baffle piano, 115
Banda critica, 34
Banda passante - fonorivelatori, 100
Bark, 37
Bass reflex, 118
Bass - controllo toni, 149
Battimenti, 10
Bilanciamento amplificatori, 150
— laterale braccio, 82
— statico - braccio, 80
Braccio articolato, 75
— tangenziale, 73
— unipivot, 67
BSI, 47
Bulino, 48; 70

C

Camera anecoica, 10
— riverberante, 10
Campi incrociati, 201
Cancellazione del nastro, 198
Capstan, 192
Cartucce, 213
Casse acustiche, 115
Casse attive, 121
Cassetta aperta, 116
— chiusa, 117
Cassette, 212
Clipping, 158
Coefficiente di assorbimento, 20
— elasticità - braccio, 84
Colorazione dei suoni, 25
Complianza (Compliance), 84; 101
Controlli amplificatori, 145
Controllo automatico di guadagno, 172
Controllo fisiologico del volume, 150
Correzione della curva di risposta - registratori, 202
— dell'incisione, 50
Cross-over, 124
Cuffia, 137
Curva di risposta in frequenza - altoparlanti, 125
Curve di correzione - nastro, 205
Curve isofoniche, 31
— — suono diffuso, 34

D

Decibel, 11
Decodifica stereo - sintonizzatori, 172
Deenfasi, 167
Demodulazione, 169
Diafonia, 85; 100
DIN, 47
Dinamica, 13; 146
DNL, 211

Direttività altoparlanti, 126
Direzionalità - microfono, 181
Distorsione altoparlanti, 129; 134
— armonica, 158
— di fase, 154
— di frequenza, 156
— di incrocio - TID, 161
— di intermodulazione, 160
— — dinamica - TIM, 161
— microfono, 184
Dolby, 209

E

Eco, 9
Efficienza - altoparlanti, 128
Equalizzazione RIAA, 144
Errore di pista (lateral tracking error), 70
— di perpendicolarità - puntina, 76

F

Fabbricazione dei dischi, 56
Fase, 5; 8
Fattore di smorzamento, 152
Filodiffusione, 168
Flutter, 60
FM - ricezione, 169
Fonometro, 14; 15
Fonorivelatori, 85
— a bobina mobile, 94
— ceramici, 89
— a condensatore, 91
— a cristallo, 87
— a magnete indotto, 97
— — mobile (magnetodinamici), 96
— a riluttanza variabile, 91
— a semiconduttori, 90
Frequenza, 2; 5
Frequenze: gravi, medie, acute, 14
— di risonanza o proprie - per gli ambienti, 23
Frequenze di taglio - altoparlanti, 124
— udibili, 2

G

Gamma sonora, infrasonora, ultrasonora, 2
— AM, 167
— FD, 168
— FM, 166
Graphic equalizer, 148; 150

I

IEC, 47
IHF, 47
IL, 12
Impedenza acustica, 114
— altoparlante, 109; 134
— ingresso - amplificatore, 152
— microfono, 184
Incisione orizzontale, 48
— stereofonica, 48
— verticale, 47
Inerzia - braccio, 83
Intensità, 3
— acustica, 12
Interferenza, 8
Intermodulazione - fonorivelatori, 101
Isteresi, 196

L

Labirinto acustico, 119
Lettura - nastro, 202
Livello d'intensità acustica, 12
— di potenza acustica, 11
— di pressione acustica, 11
Lunghezza d'onda, 2

M

Mascheramento effetto, 38
Massa braccio, 83
Materiali fibrosi, 26
— fonoassorbenti, 26
Mel, 37
MFB, 122
Microfono, 175
— bidirezionale, 185
— a carbone, 175
— ceramico (elettrostrittivo), 179
— a condensatore (elettrostatico), 177
— dinamico (a nastro o a bobina mobile), 179
— elettromagnetico (a ferromobile), 176
— panoramico, 182
— piezoelettrico, 178
— unidirezionale, 185
Mid range, 108; 124

Misura di potenza negli amplificatori, 150
Modulazione di ampiezza, 167
— di frequenza, 165
Motore a corrente alternata, 61
— — continua, 61
— a effetto Hall, 61; 66

N

Nastro magnetico, 196; 215

O

Offset, 73
Onda sinusoidale, 4
Onde stazionarie, 8
Ottava, 14
— melodica, 36
Overhang, 72

P

Pannelli flessibili, 26
Periodo, 5
Peso di lettura - fonorivelatori, 80
Phon, 31
Piatto, 66
Ponderazione - curve, 15
Potenza altoparlanti, 129
Preamplificatore, 142
Preenfasi, 167
Premagnetizzazione, 201
Proporzioni geometriche per ambienti, 25
Puntina ellittica, 99
— radiale, 99
— shibata, 99

Q

Quadrafonia, 43; 51
— CD4, 52
— a matrice, 54
— metodi passivi, 55

R

Registratore ad un solo motore, 194
— a tre motori, 195
Registrazione su nastro, 199
— del suono, 45
Rendimento - altoparlanti, 128
RIAA curva incisione, 50
Riflessione, 8
Rimbombo, 9
Riproduzione magnetica, 202
Risuonatori, 27
Riverberazione, 9
— ambiente, 19
Rumble, 60
Rumore - amplificatore, 146
— microfoni, 183
— registratori, 208
— rosa, 16

S

Sabine, formula, 21
Scratch, 147
Sensibilità - fonorivelatori, 102
— ingresso amplificatore di potenza 152
— ingresso fono, 145
— microfoni, 180
Sfasamento, 7
Sistema discreto CD4, 53
— a matrice SQ e QS, 54
Skating, 78
Smorzamento - amplificatore, 152
S/N, 146; 162
Son, 32
SPL, 11
Spettrometro, 16
Spettro sonoro, 5; 40
Squawker, 108; 124
Stabilità amplificatori, 163
Stereofonia, 42
Stevens - diagramma, 37
Stilo o puntina, 98
Suoni diffusi - intensità, 33

T

Tempo di riverberazione, 9; 19
— di salita, 156; 157
Testina magnetica registrazione, 197
Timbro, 3; 40
Transitori d'attacco e d'estinzione, 41; 42
Trascinamento piatto, 59
Trasmissione con puleggia - giradischi, 62

— con cinghia giradischi, 64
— diretta - giradischi, 65
Trasmissione diretta - registratore, 194
— indiretta - registratore, 193
Treble, 147
Tromba, 121
Tweeter, 108; 124

U

Unità assorbente, 21

V

Velocità di propagazione - suono, 2
— di rotazione - piatto, 59
Volume - comando amplificatore, 150
— sonoro, 32
— — mascheramento, 39

W

WL, 11
Wow, 60
Woofer, 108; 124.

Volume con i tipi e stampa della
IGIS SpA
Industrie Grafiche Italiane Stucchi
20138 Milano (Italy) - Via Salomone 61

U H